





**Daniel Jorge  
Lobato de Macedo**

**O Plano de Controlo das Redes de Transporte  
Ethernet**



**Daniel Jorge  
Lobato de Macedo**

**O plano de controlo das redes de transporte  
Ethernet**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Dr. Armando Nolasco Pinto, Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho aos meus pais pelo seu incansável apoio.

## **o júri**

presidente

**Professor Doutor José Carlos da Silva Neves**

Professor Catedrático do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da  
Universidade de Aveiro

**Doutor Jorge Costa de Sousa Castro**

Investigador do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto

**Professor Doutor Armando Humberto Moreira Nolasco Pinto**

Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da  
Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Em primeiro lugar queria agradecer ao Doutor Armando Nolasco Pinto pela sua orientação e disponibilidade ao longo deste trabalho.  
Gostaria também de agradecer aos meus pais, pela sua ajuda, presença, compreensão e apoio, essenciais para superar os momentos de dificuldade.

**palavras-chave**

Redes de Transporte, SDH, WDM, canais ópticos, Ethernet, Carrier Ethernet, multicast, unicast, OAM

**resumo**

As redes de transporte são, actualmente, suportadas principalmente pela tecnologia SDH sobre canais ópticos WDM. Com a evolução dos serviços, tem crescido a necessidade de suportar de forma eficiente tráfego de dados, tráfego do tipo rajada e do tipo ponto-multiponto. A tecnologia SDH não foi projectada para operar neste contexto, aumentando a ineficiência ao nível do transporte.

A tecnologia Ethernet surge nesse contexto como promissora para fornecer uma camada entre a camada óptica WDM e a camada de rede.

Nesta dissertação são, então, identificadas as motivações que estão a levar a Ethernet para a área do transporte, com os seus pontos fortes e fracos na referida área. Por conseguinte é abordado o conceito de *Carrier Ethernet*, nomeadamente no que diz respeito às suas características. É ainda estudado o conceito de IPTV móvel, nomeadamente no que diz respeito às suas características, limitações e exigências. Finalmente são analisados, de forma crítica, as duas soluções (modelação matemática) para a distribuição de canais numa rede de transporte: cenário estático e cenário dinâmico.

**keywords**

Carrier Networks, SDH, WDM, optical channels, Ethernet, Carrier Ethernet, multicast, unicast, OAM

**abstract**

Carrier networks are currently supported mainly by SDH on WDM optical channels technology. With the evolution of services, the need to efficiently support traffic burst type and support point-multipoint communications has increased. The SDH technology was not designed to operate in this context, increasing inefficiency at the level of transport.

The Ethernet technology appears promising, in this context, as to provide a layer between the WDM optical layer and network layer.

The motivations that are driving the Ethernet to the carrier network area, with its strengths and weaknesses, are identified in this dissertation. Therefore is introduced the concept of Carrier Ethernet, namely with regard to its characteristics. It is also studied the concept of mobile IPTV, particularly with regard to its characteristics, limitations and requirements. Finally, this dissertation analyzes, critically, the two solutions (mathematical modeling) for the distribution of channels on a carrier network: static and dynamic scenery.



# Índice

Índice .....	i
Índice de Imagens .....	iii
Índice de Tabelas .....	v
Lista de Acrónimos .....	vii
Lista de Variáveis .....	ix
1 Introdução .....	1
1.1 Perspectiva histórica .....	1
1.2 Ethernet .....	5
1.3 Objectivos .....	6
1.4 Estado da arte .....	7
1.5 Estrutura .....	8
2 Carrier Ethernet .....	9
2.1 Introdução .....	9
2.2 A razão do Carrier Ethernet .....	9
2.3 O que são os Serviços Carrier Ethernet .....	10
2.3.1 Serviços Normalizados .....	11
2.3.2 Escalabilidade .....	15
2.3.3 Fiabilidade .....	15
2.3.4 Qualidade de Serviço .....	16
2.3.5 Gestão do serviço .....	18
2.4 Razões da Rede Carrier Ethernet .....	19
2.4.1 Características da Rede Carrier Ethernet .....	22
2.4.1.1 Escalabilidade .....	22
2.4.1.2 Fiabilidade .....	24
2.5 Problemas do Carrier Ethernet .....	24
3 IPTV Móvel .....	29
3.1 Introdução .....	29
3.2 IPTV .....	32
3.3 Expansão do IPTV .....	34
3.3.1 Limitações do IPTV móvel .....	34
3.4 Cenário alvo .....	36

3.5	Exigências .....	37
4	Modelo Matemático .....	45
4.1	Introdução ao Modelo Matemático .....	45
4.2	Coexistência de Unicast e Multicast .....	46
4.2.1	Cenário Estático .....	49
4.2.2	Parâmetros do Cenário Estático: M.....	58
4.2.3	Cenário Dinâmico .....	62
5	Conclusões .....	69
Anexo A	.....	75
A.1	– Variáveis e Processos de <i>Bernoulli</i> .....	75
A.2	– Distribuição binomial .....	75
A.3	– Distribuição Multinomial .....	76
A.4	– Esperança matemática e variância.....	77
Referências Bibliográficas	.....	79

## Índice de Imagens

Figura 1.1 Telefonia analógica (POTS - <i>Plain old telephone system</i> ) .....	1
Figura 1.2 Sistema de Transmissão .....	2
Figura 1.3 Estrutura actual das redes, onde os utilizadores não estão limitados à telefonia fixa .....	5
Figura 2.1 <i>Carrier Ethernet</i> e os seus atributos .....	11
Figura 2.2 E-Line.....	12
Figura 2.3 E-Lan.....	12
Figura 2.4 E-Tree.....	13
Figura 2.5 <i>Carrier Ethernet</i> independente da estrutura física da rede .....	14
Figura 2.6 Distribuição dos Serviços de Ethernet (caso EUA) .....	16
Figura 2.7 Convergência de dados, voz e vídeo .....	17
Figura 2.8 A passagem de Ethernet para rede de transporte .....	20
Figura 2.9 Grande parte do tráfego começa ou acaba numa porta Ethernet.....	21
Figura 2.10 Alcance do <i>Carrier Ethernet</i> .....	23
Figura 2.11 Ligação entre vários Service Providers (SP).....	27
Figura 3.1 Rede com ligações ponto-a-ponto.....	30
Figura 3.2 Rede com ligações ponto-multiponto .....	31
Figura 3.3 Cenário alvo: rede móvel de televisão .....	37
Figura 3.4 Cenário alvo (simplificação).....	39
Figura 4.1 Custo ( $r_s$ ) em função do número de canais multicast (M) para 3 valores diferentes do número de utilizadores (N).....	51
Figura 4.2 Função de Distribuição Cumulativa Complementar em função do custo $r_s$ .....	53
Figura 4.3 Número de combinações possíveis entre o número de canais disponibilizados (K) e o número de clientes (N) .....	54
Figura 4.4 Detalhe da figura 4.3. O esforço computacional é tão forte para determinar as combinações (referidas na figura 4.3), que o Matlab® não consegue concluir os cálculos.....	55
Figura 4.5 Variação do custo $R_s$ com o número de canais multicast (M) para dois valores diferentes de $\beta$ .....	58
Figura 4.6 Variação do custo $R_s$ com o número de canais multicast (M) para 3 valores diferentes do grau de actividade ( $a$ ) .....	58
Figura 4.7 Função distribuição de $r_s$ .....	59
Figura 4.8 Variação do número de canais multicast (M) com o grau de actividade ( $a$ ).....	61
Figura 4.9 Probabilidade conjunta dos canais multi e unicast.....	63



## Índice de Tabelas

Tabela 3.1 Características das Classes de Serviço .....	38
Tabela 3.2 Divisão dos fluxos de informação com o número de CoS disponíveis .....	42



## Lista de Acrónimos

ATM	Asynchronous Transfer Mode
CIR	Committed Information Rate
CoS	Class of Service
EVC	Ethernet Virtual Connection
FDM	Frequency Division Multiplex
GIWF	Generic Inter-working Function
IP	Internet Protocol
IPTV	Internet Protocol Television
ITU-T	International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector
LAN	Local Area Network
LB	Largura de Banda
MAN	Metropolitan Area Network
MEF	Metro Ethernet Forum
OAM	Operational, Administration and Maintenance
OPEX	Operational Expenditures
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
QoS	Qualidade de Serviço
RAN BS	Radio Access Network, Base Station
RAN CE	Radio Access Network, Customer Edge
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SLA	Service Level Agreements
SONET	Synchronous Optical Network
STA-TDM	Statistical TDM
STP	Spanning Tree Protocol
TDM	Time Division Multiplex
UNI	User Network Interface
VoIP	Voice Over Internet Protocol
VPN	Virtual Private Lines
WAN	Wide Area network
WDM	Wavelength-Division Multiplexing





## Lista de Variáveis

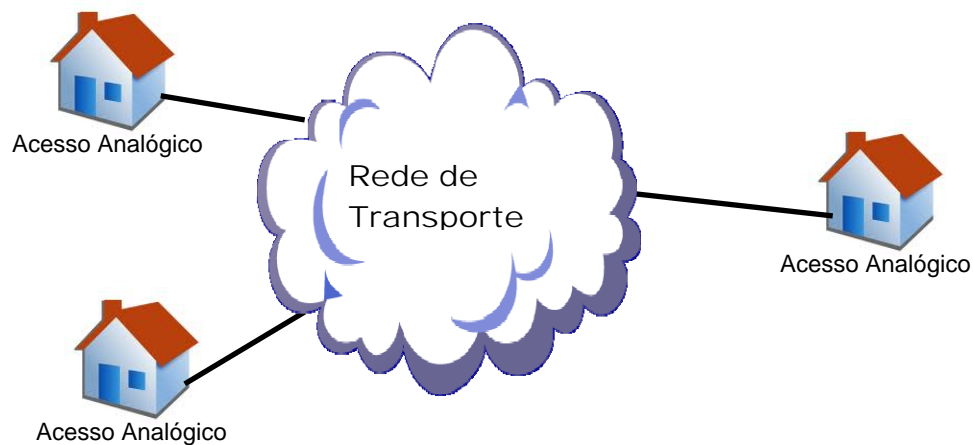
$K$	Número de canais oferecidos aos clientes
$d$	Constante de normalização
$k$	Categoria do canal
$\alpha$	Variável de Zipf
$\pi_k$	Popularidade do canal
$\Pi$	Vector de dimensão $K$
$a$	Probabilidade de um utilizador se encontrar activo
$\beta$	custo multicast/custo unicast
$N$	Número de utilizadores do sistema
$b_k, c_k$	Utilizador sintonizado no canal $K$
$C$	Vector de dimensão $K$ com entradas $c_k$
$n_a$	Numero de utilizadores activos
$n_i$	Número de utilizadores inactivos
$n$	Número de clientes activos
$M$	Canais com maior popularidade
$P_m$	Probabilidade de um utilizador querer ver um canal multicast
$P_u$	Probabilidade de um utilizador querer ver um canal unicast
$r$	Numero de recursos
$r_s$	Recursos necessários (em custo de canais unicast) no cenário estático
$r_D$	Recursos necessários (em custo de canais unicast) no cenário dinâmico
$P_{\text{bloq}}$	Probabilidade de bloqueio
$n_m$	Numero de canais multicast
$n_u$	Numero de canais unicast
$c_m$	Custo dos canais multicast
$c_u$	Custo dos canais unicast



# 1 Introdução

## 1.1 *Perspectiva histórica*

Uma das razões mais importantes para o uso da fibra óptica como canal de comunicação das redes é uma cada vez maior necessidade de largura de banda, sendo que a fibra óptica é o canal de comunicação conhecido até ao momento que possibilita a maior largura de banda. Inicialmente os utilizadores residenciais e as empresas usavam telefonia fixa com uma largura de banda inferior a 4 kHz, o que originava um ritmo de 64 kbps. De facto, o tráfego ao sair da rede de acesso (analógica) e ao entrar na rede de transporte (digital) passava por um conversor que limitava o ritmo à velocidade indicada.



**Figura 1.1** Telefonia analógica (POTS - *Plain old telephone system*)

Antes de prosseguir é importante esclarecer alguns conceitos. Nem sempre a capacidade de um canal de comunicação é utilizada na sua totalidade, quando se transmite um único sinal. Nestas circunstâncias, é possível transmitir vários sinais no mesmo canal, processo que é denominado por multiplexagem. As duas formas mais comuns para fazer a multiplexagem são: no tempo (TDM – Time Division Multiplex) ou na frequência (FDM – Frequency Division Multiplex).

Nos sistemas de transmissão digitais os sinais são multiplexados na entrada do canal de comunicação, atravessam o referido canal e são desmultiplexados na saída. O sincronismo é importante para que este processo de multiplexagem/desmultiplexagem funcione correctamente e os sinais sejam correctamente reagrupados no final da transmissão.



**Figura 1.2 Sistema de Transmissão**

Uma rede digital de telecomunicações possui vários níveis de multiplexagem que, no seu conjunto, formam uma hierarquia digital. Nas hierarquias digitais mais antigas cada entrada digital pode possuir um relógio diferente o que poderá levar a uma frequência de multiplexagem diferente. Desta forma não existe um mecanismo que possibilite um sincronismo comum a toda a rede.

A Hierarquia Digital Plessíncrona (PDH – Plesiochronous Digital Hierarchy) visou resolver o problema acima mencionado. Neste método poderá acontecer que alguns ciclos do relógio de saída não possuam bits do sinal de entrada. Nestes espaços vazios que se criam são, então, introduzidos bits de aposição (enchimento). Uma vez que estes bits têm de ser removidos no desmultiplexer (para restaurar os sinais originais) são introduzidos ainda bits de controlo com o objectivo de indicar quais são os bits de aposição. No entanto, estes bits ‘extra’

dificultam o acesso a canais individuais que sejam introduzidos nos níveis inferiores da hierarquia. Isto acontece porque o uso de bits de aposição leva a que para se obter um sinal num nível inferior na hierarquia se tenha de descer sucessivamente nessa mesma hierarquia. Para obter ritmos superiores utilizando o PDH, a situação acabaria por se tornar insustentável (devido à criação de um número excessivo de níveis).

Mais tarde, os laboratórios Bellcore (EUA) desenvolveram a norma SONET (Synchronous Optical Network) com o propósito de simplificar a hierarquia digital existente à altura, eliminando os bits de aposição. Foi introduzida uma frequência de referência, permitindo que a rede, no seu conjunto, funcione em fase. Esta norma é, por vezes, conhecida por *Norma Americana*.

A *Norma Europeia*, posterior à *Norma Americana*, resulta de uma modificação do SONET e adquiriu o nome de Hierarquia Digital Síncrona (SDH – Synchronous Digital Hierarchy) tendo sido aprovada pelo ITU-T (International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector) sediado em Genebra (Suíça). Foi adoptada pelo mesmo organismo em 1998. Algumas das características mais importantes do SDH são o fácil acesso aos tributários e a existência de uma estrutura de tramas síncronas para tráfego digital multiplexado. É possível, contudo, estabelecer uma correspondência entre as hierarquias das duas normas referidas.

Tanto a tecnologia PDH como a tecnologia SDH foram pensadas tendo em conta a transmissão da voz humana, funcionando segundo a ‘comutação de circuitos’. Por esse motivo, adaptam-se a serviços que possuam tráfego contínuo (tal como o serviço de voz). No caso destas tecnologias, a atribuição regular de faixas temporais (regulares) aos diversos canais permite construir o sinal. Isto faz com que cada faixa temporal, durante uma ligação, esteja dedicada a um único canal não havendo, portanto, partilha de recursos entre várias chamadas simultâneas. Pode, então, ocorrer um desperdício de recursos. No caso de fluxo de dados relativamente contínuo o problema não se verifica mas se o fluxo de dados não for assim tão contínuo (exemplo de transferência de dados entre computadores), poderão ocorrer

longos momentos de silêncio em que os recursos, por serem dedicados, não estão a ser usados para trabalho útil. Imediatamente a seguir aos momentos de silêncio poderão ocorrer fluxos de dados do tipo rajada. Com o crescer de aplicações além do serviço de voz, com tráfego não contínuo, este tipo de técnicas mostrou-se ineficiente. Na verdade o paradigma das telecomunicações está claramente a mudar: contrariamente ao que acontecia no início das telecomunicações, cada vez há menos tráfego de voz e mais tráfego de dados. Isto significa que o processamento do tráfego tem de se adaptar à nova realidade: se antes se tinha uma rede de comutação de circuitos, agora há necessidade de redes baseadas em comutação de pacotes.

A ineficiência referida anteriormente levou, então, ao surgimento tecnologias de multiplexagem estatística no domínio do tempo em que as faixas temporais já não são dedicadas mas são reguladas por um algoritmo de escalonamento. Esta tecnologia é utilizada nas redes com comutação de pacotes. Através desta mudança de tecnologia, atinge-se uma eficiência desejada atribuindo o canal de comunicações aos utilizadores de uma forma mais justa. Verificou-se, assim, uma mudança de comportamento pois as tecnologias de PDH e SDH (comutação de circuitos) usavam a multiplexagem determinística.

Relativamente às redes iniciais de telefonia fixa, a realidade mudou e os utilizadores finais usualmente não possuem somente telefonia fixa (ver figura 1.3). É frequente os utilizadores possuírem pequenas redes locais. Desta forma, é comum o utilizador final ter à saída (entrada) das suas instalações interfaces Ethernet. Nas redes de transporte, o material de suporte, pelo motivo já apresentado, continua a ser a fibra óptica mas as camadas superiores têm de mudar para acomodar os diversos ritmos de transmissão das redes de Ethernet dos clientes. Desta forma, sobre a fibra óptica é colocada uma rede óptica de transporte e sobre esta é colocada uma camada de Ethernet. É de salientar que a fibra óptica, presentemente, é usada sobretudo no ‘core’ das redes mas existe uma tendência para levar a fibra óptica até às instalações do cliente.

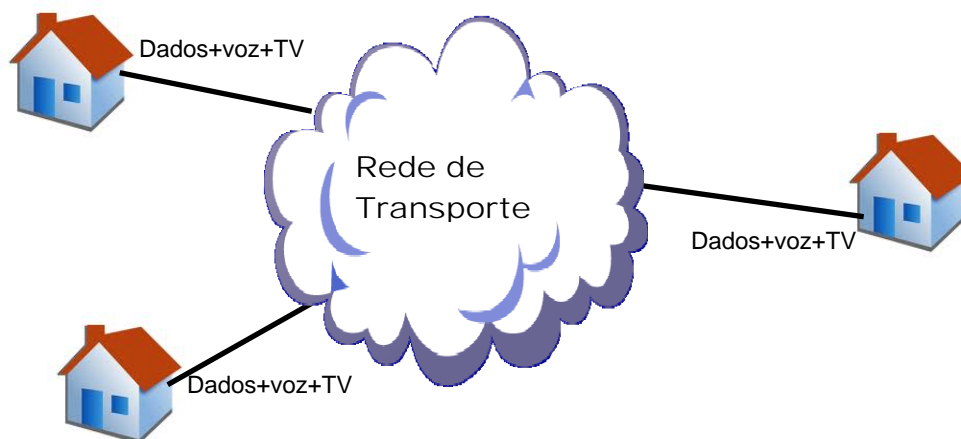


Figura 1.3 Estrutura actual das redes, onde os utilizadores não estão limitados à telefonia fixa

## 1.2 Ethernet

A Ethernet é a tecnologia de LAN's (*Local Area Network's*) mais instalada e usada no Mundo, tendo ganho terreno relativamente a outras tecnologias como o Token-Ring. Tal como já foi aludido, baseia-se na comutação de pacotes e foi padronizada pelo IEEE num conjunto de normas da família 802.3. Esta tecnologia é compatível com as redes Wi-Fi (802.11).

Originalmente foi desenvolvida pela Xerox a partir de uma tecnologia anterior chamada Aloha (Palo Alto Research Center Aloha Network) e usava o mecanismo de controlo de acesso ao meio CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection).

Como já foi referido, a *Ethernet* foi originalmente pensada e planeada para transferências de dados em *campus* ou empresas através do uso de LAN's. No seu desenvolvimento, ao longo dos anos, tem visto a sua velocidade a aumentar: de 10 Mb/s em 1980 chegou a 10Gb/s em 2002. Por volta de 1998 a Ethernet gozava de grande sucesso como tecnologia potenciadora das LAN's. De facto, na mesma altura a Ethernet representava cerca de 80% das LAN's instaladas [1] e as interfaces de Ethernet ocupavam uma quota do mercado

de 95% [1]. Verificou-se ainda que as redes de Ethernet a 10Gb/s se ajustavam perfeitamente às redes metropolitanas [1] (ver figura 2.8).

O sistema de Ethernet IEEE 802.3 10BASE-T proporciona velocidades de transmissão de 10Mbps. O sistema de Fast Ethernet (100BASE-T) proporciona velocidades de 100Mbps, possui a capacidade de suportar estações com cartas de 10BASE-T e tem vindo a tornar-se quase norma nas interfaces Ethernet. Foram ainda desenvolvidos os sistemas de Gigabit Ethernet (velocidades de transmissão até 1Gbps) usado nas redes de backbone e finalmente a 10 Gigabit Ethernet.

É necessário, então, fazer face às novas exigências relativamente ao tráfego. As interfaces Ethernet, como já se viu, ocupam uma elevada quota do mercado. Desta forma grande parte dos clientes coloca na rede tráfego através de uma interface de Ethernet. De modo análogo os mesmos clientes também recebem tráfego através de uma interface Ethernet. Esse tráfego tem de ser transportado. Apesar de haver várias soluções possíveis para o transporte do tráfego, a tecnologia Ethernet surge, pelos factos já mencionados, como uma forte alternativa para fornecer uma camada de transporte entre as camadas SDH e de rede. Já se vislumbram, contudo, algumas limitações que serão abordadas mais à frente.

### **1.3 Objectivos**

Através deste trabalho de dissertação pretende-se começar por identificar as razões e vantagens da Ethernet na área de transporte (pontos fortes e fracos). Pretende-se ainda perceber de que forma a Ethernet pode ser usada para suportar serviços do tipo IPTV.



## 1.4 Estado da arte

São vários os estudos feitos para a adaptação da tecnologia de Ethernet a redes de transporte. Em [2] é abordada a importância da Ethernet nas redes metropolitanas dada a crescente importância de aplicações como VoIP, *streaming* de vídeo e multimédia, nomeadamente em redes sem fios.

Por outro lado já se encontram no mercado diversos serviços de televisão móvel. Tradicionalmente esses serviços eram distribuídos em broadcast mas começam a ser distribuídos, também, em unicast seguindo a filosofia de *on-demand streaming*. Assim, também existem estudos que começam a procurar descobrir qual a melhor maneira de distribuir os canais de TV móvel: se em unicast, se em multicast ou numa solução híbrida ([3]-[5]). Na referência [3] são, então, apresentados resultados de simulação que mostram que a optimização de uma rede de TV passa por transmitir os canais mais populares em broadcast e os restantes em unicast (a pedido).

Em [4] é colocada em evidência a incapacidade dos actuais sistemas de comunicação suportarem muitas dos serviços futuros. Apesar da terceira geração de redes móveis já se encontrar substancialmente desenvolvida, ainda possui limitações para transmitir ficheiros de elevada dimensão ou *streams* (seja áudio ou vídeo) para vários clientes simultaneamente. Desta forma, nesta referência é estudada uma solução híbrida, sendo analisado o seu comportamento em termos de estabilidade e tempos de resposta. É ainda feita a comparação desta solução com os modelos tradicionais.

Finalmente em [5] é colocada em destaque a mudança de paradigma que se tem vindo a verificar nas redes móveis. De facto as redes móveis têm sido associadas a transmissões *broadcast* mas a transmissão em *unicast* pode ser suficiente em muitos casos pois os utilizadores das redes móveis tendem a preferir aceder aos conteúdos ‘a pedido’ (*on demand*) sem estarem limitados aos horários de transmissão fixos. Nesta referência são estudadas as limitações das redes móveis (em termos de capacidade) para distribuição de TV Móvel via unicast. Tendo em vista também a distribuição em broadcast é ainda estudado o MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service). Uma vez analisadas as hipóteses de distribuição em unicast e broadcast é posta como melhor solução uma hipótese híbrida.

## **1.5 Estrutura**

Este trabalho de dissertação é composto por cinco capítulos e um anexo.

No primeiro capítulo é apresentada uma perspectiva histórica da evolução das redes. São ainda apresentados os objectivos do trabalho, os motivos para a sua escolha, o estado da arte e a estrutura do documento.

No segundo capítulo é apresentada uma introdução ao conceito de *Carrier Ethernet*, sendo os seus objectivos e as suas características os principais pontos focados.

Com o terceiro capítulo é feita uma introdução aos serviços de IPTV móvel: características, desenvolvimento e limitações. Ainda neste capítulo é apresentado um cenário alvo de estudo. Relativamente ao cenário, são tecidas várias considerações quanto às suas exigências.

O quarto capítulo contém um modelo matemático, capaz de modelar o cenário apresentado no capítulo anterior. São feitas conjecturas e propostas sobre o mesmo. Ainda neste capítulo é aplicado o modelo matemático apresentado anteriormente, com simulações via Matlab.

O quinto e último capítulo possui uma conclusão deste trabalho. Esta dissertação inclui ainda um anexo com alguns conceitos sobre a teoria das probabilidades, relevante para a compreensão do modelo apresentado no capítulo 4.

## 2 Carrier Ethernet

### 2.1 Introdução

Pretende-se com este segundo capítulo, que está dividido em duas partes, introduzir o tópico *Carrier Ethernet*. Na primeira parte serão abordados os Serviços *Carrier Ethernet*. Em particular tentar-se-á responder às seguintes questões:

- a) Qual a razão de ser do seu aparecimento?
- b) Quem está a promover o *Carrier Ethernet*?
- c) O que é o *Carrier Ethernet* e quais são os seus atributos?

Na segunda parte será abordada a questão da tecnologia de rede *Carrier Ethernet*, nomeadamente as razões do aparecimento desta tecnologia, as suas características e os problemas que subsistem na aplicação do *Carrier Ethernet*.

### 2.2 A razão do *Carrier Ethernet*

Antes de prosseguir é importante esclarecer que o conceito de *Carrier Ethernet* pode estar associado a dois pontos diferentes: serviços e tecnologia de rede. Relativamente aos serviços *Carrier Ethernet*, o MEF já tem trabalho desenvolvido. Mais detalhes sobre este ponto serão apresentados mais à frente neste capítulo. Já no que diz respeito à tecnologia de rede *Carrier Ethernet*, a mesma não se encontra definida (encontrando-se ainda em fase de estudo).

Ao existir uma crescente necessidade de uma elevada largura da banda a um custo progressivamente mais baixo, parece pacífico que uma nova tecnologia emergente que resolva este problemas necessita, por forma a obter sucesso na sua implementação prática, de conseguir suportar tanto os serviços existentes actualmente (ainda que venham a cair em desuso) como novos serviços que venham a surgir. É imperativa esta capacidade de adaptação e conciliação.

## 2.3 O que são os Serviços Carrier Ethernet

Segundo o MEF (*Metro Ethernet Forum*), o *Carrier Ethernet* tem a seguinte definição formal:

***«The MEF has defined Carrier Ethernet as a ubiquitous, standardized, carrier-class Service and Network defined by five attributes that distinguish Carrier Ethernet from familiar LAN based Ethernet.»*** (referência [6])

Quer isto dizer que o *Carrier Ethernet* é um serviço e uma rede de transporte normalizada e ubíqua que se distingue das tradicionais LAN's através de cinco atributos. Esses atributos, sem qualquer ordem particular, são os seguintes:

- Serviços normalizados
- Escalabilidade
- Fiabilidade
- Qualidade de serviço
- Gestão do serviço

Para que o *Carrier Ethernet* assim possa ser chamado de facto, o MEF impõe regras que, por saírem fora do âmbito deste capítulo, não serão aqui abordadas. Informações mais detalhadas poderão ser encontradas na referência [6].

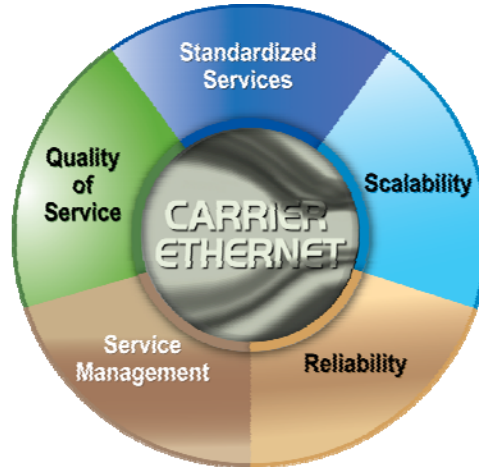


Figura 2.1 *Carrier Ethernet* e os seus atributos [6]

### 2.3.1 Serviços Normalizados

Esta característica possibilita que o *Service Provider* possa distribuir aos seus clientes um conjunto de serviços do tipo ponto-a-ponto, multiponto-a-multiponto e ponto-multiponto de uma forma determinística sobre uma plataforma de equipamentos normalizados. É por este atributo que não existe a necessidade de mudança de equipamento por parte do cliente conseguindo-se, contudo, acomodar tanto os serviços antigos como novos serviços que venham a surgir. Quer isto dizer que é possível estabelecer serviços de *Ethernet* independentemente do tipo de dados e da estrutura física da rede. Esta característica é definida por cinco parâmetros que se descrevem de seguida:

- **Ubiquidade:** o *Carrier Ethernet* permite a existência omnipresente de serviços de Ethernet através de equipamentos normalizados independentemente do tipo de

dados ou da estrutura física da rede. É graças a este parâmetro que é possível pensar na extensão da Ethernet a nível global.

- **Serviços de Ethernet:** o *Carrier Ethernet* consegue suportar três tipos de serviços:

a) E-Line (ligações ponto-a-ponto).

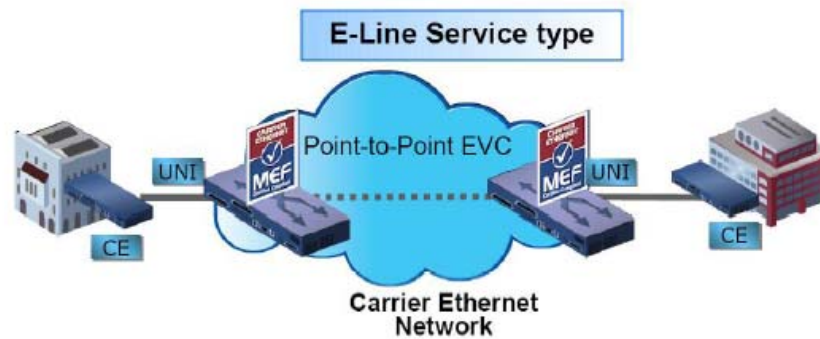


Figura 2.2 E-Line [6]

Estas ligações permitem suportar *Ethernet Private Lines*; interligação de *Virtual Private Lines* (VPN) e *Ethernet Internet Access*.

b) E-Lan (ligações multiponto-a-multiponto).

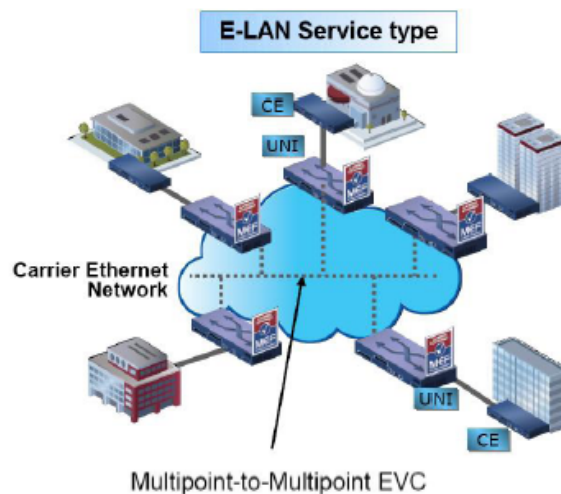
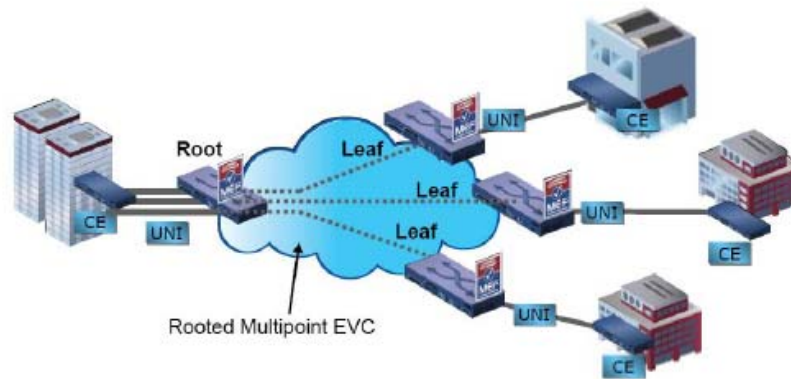


Figura 2.3 E-Lan [6]

Estas ligações são usadas para criar ligações VPN de nível 2, serviços LAN transparentes e redes de *multicast*.

c) E-Tree (ligações ponto-multiponto)



**Figura 2.4 E-Tree [6]**

Estas ligações são usadas para quaisquer aplicações que exijam o uso de uma topologia do tipo ponto-multiponto e permite a separação do tráfego respeitante a vários UNI's. O tráfego circula entre o UNI<sup>1</sup> e o *router* e nunca entre UNI's.

---

<sup>1</sup> O UNI (*User Network Interface*) não é mais do que a interface que é usada para ligar, numa rede, o utilizador (ou cliente) ao *Service Provider* (ou Operador). Desta forma é possível concluir que o UNI permite fazer uma separação clara, na rede, entre a área de responsabilidade do cliente e a área de responsabilidade do Operador.

O EVC (Ethernet Virtual Connection) é uma estrutura que possui duas funções:

1. Indicar, num dado fluxo de dados, a associação dos UNI nele presentes;
2. Evitar fluxo de dados entre locais que não pertençam ao mesmo EVC.

- **Circuit Emulation Services (CES):** o *Carrier Ethernet* suporta não só serviços baseados em *Ethernet* distribuídos através de diversas (outras) tecnologias de transporte como também serviços (TDM) transportados sobre o próprio *Carrier Ethernet*. O suporte de serviços TDM é importante do ponto de vista dos *Service Providers* uma vez que ainda são uma importante fonte de rendimentos.
- **Granularidade e Qualidade de Serviço:** os serviços suportados pelo *Carrier Ethernet* proporcionam uma vasta gama de granularidades de largura de banda possíveis e, consequentemente, uma também vasta gama de qualidades de serviço. Estas características são importantes para os *Service Providers* na medida em que eles têm de acomodar vários tipos de clientes, cada um com exigências específicas.
- **Transporte de convergência:** os tráfegos de voz, dados e vídeo são transportados através de um único transporte – *Ethernet*. Simplifica-se, assim, a distribuição e gestão desses serviços assim como a adição de novos.

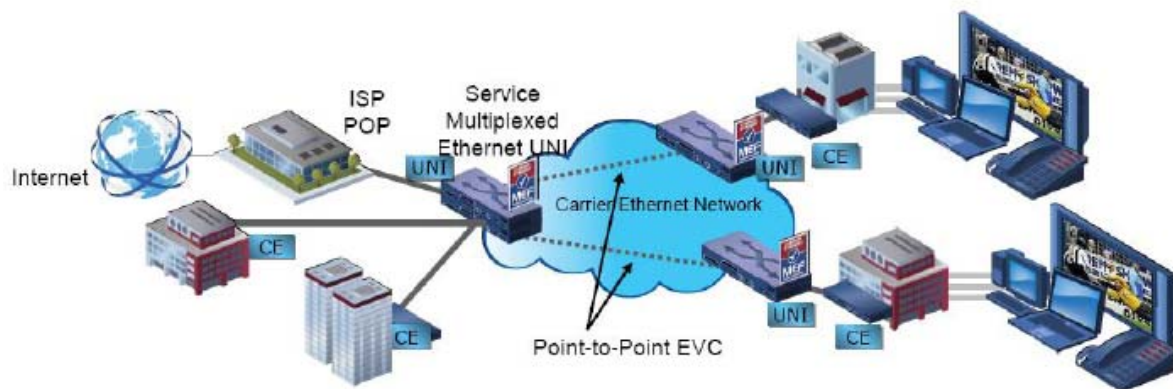


Figura 2.5 *Carrier Ethernet* independente da estrutura física da rede [6]

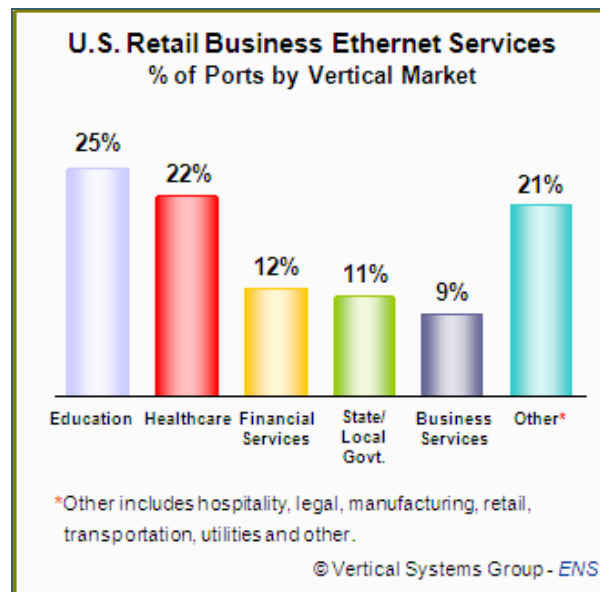


### 2.3.2 Escalabilidade

A escalabilidade é um dos atributos dos Serviços *Carrier Ethernet* e encontra-se intimamente relacionado com o número de clientes. Este atributo possibilita que os serviços estejam disponíveis para todos os clientes, independentemente do seu número, ou seja, sejam eles uma dezena ou um milhão. O tema da escalabilidade será retomado mais à frente, quando se falar nas características da tecnologia de rede *Carrier Ethernet*.

### 2.3.3 Fiabilidade

Os Serviços *Carrier Ethernet* devem ser capazes de suportar aplicações críticas (Sistema de Saúde, Educação, Finanças e os restantes Sistemas Governamentais) (referência [4]). Essas aplicações podem ocupar uma elevada percentagem do mercado, conforme se pode ver na figura 2.6 (para o caso dos EUA), pelo que é importante serem tidas em consideração. Desta forma, de modo a que as falhas sejam eliminadas (ou substancialmente minimizadas), é importante a detecção de falhas no serviço (quer seja a nível físico como na camada de Ethernet) de uma forma rápida e remota. Mais detalhes serão dados mais à frente, quando se falar nas características da tecnologia de rede *Carrier Ethernet*.



**Figura 2.6 Distribuição dos Serviços de Ethernet (caso EUA)**

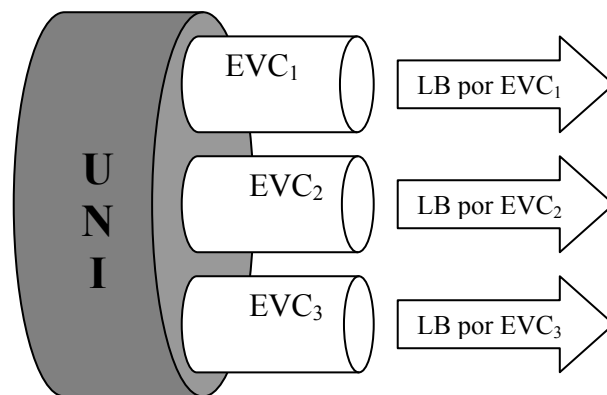
### 2.3.4 Qualidade de Serviço

Um dos desafios reside no facto de um *Service Provider* ter de fornecer vários serviços (muitos deles críticos, como já se teve oportunidade de ver) a vários clientes. A natural limitação de recursos leva a que a gestão da qualidade de serviço não seja simples. De facto, recursos como a largura de banda disponível são limitados e nem sempre são constantes uma vez que podem variar de dia para dia ou até, dentro do mesmo dia, de hora para hora. No entanto, mesmo com recursos limitados, e com a sua disponibilidade a variar constantemente, é de esperar que seja atingido determinado nível de desempenho (dependente do tipo de serviço que esteja em causa). Por exemplo, é de esperar que numa transmissão de um vídeo as imagens tenham uma dinâmica em tempo real e que as mesmas não estejam desfasadas do respectivo som.

Por a largura de banda ser um recurso limitado, os diminutos incrementos da mesma (referidos anteriormente) levam à sua poupança. É assim possível obter um grande número de vantagens, das quais se destaca a poupança em termos económicos.

No decorrer deste texto já se aludiu à ideia que o tráfego numa rede não é todo igual. Desta forma os *Service Providers* irão entregar um tipo de tráfego de acordo com a política de *best effort* enquanto outro será entregue de acordo com *Service Level Agreements* (SLA's) muito exigentes. No que diz respeito aos SLA's pode-se dizer que devem obedecer aos seguintes pontos:

- CIR (*Committed Information Rate*): a taxa de entrega das *tramas* dos pacotes atendendo aos objectivos desejados;
- *Frame Loss*: qual é a relação entre as *tramas* enviadas e aquelas que foram efectivamente recebidas pelo destinatário?
- *Frame Delay*: quanto tempo demora uma *trama* desde que é enviada até chegar ao destino, ou seja, qual é o atraso?
- *Jitter*: quais são as variações do tempo dado pelo *Frame Delay*?



**Figura 2.7** Convergência de dados, voz e vídeo

A convergência de dados, voz e vídeo (figura 2.7) é feita através da atribuição de um agregado de SLA's a cada serviço e um SLA distinto para cada aplicação dentro do próprio serviço.

### 2.3.5 Gestão do serviço

Os serviços *Carrier Ethernet* tendem a ser alargados a uma cada vez maior área geográfica. Ora acontece que gerir serviços numa vasta área geográfica exige aos *Service Providers* a capacidade de instalar, resolver problemas e actualizar os seus serviços de uma forma eficiente e rápida. Naturalmente quanto maior a área geográfica, mais complexa será a gestão. Assim, na tentativa de responder a estas questões, o *Carrier Ethernet* fornece:

- **Gestão unificada**

O *Carrier Ethernet* deve ser capaz de monitorizar, diagnosticar e gerir a infra-estrutura independentemente do vendedor/equipamento. Como se sabe para construir uma rede existem vários fornecedores de serviços e vários fornecedores de equipamento (vulgarmente conhecido por *hardware*). A existência destas variáveis torna, actualmente, difícil a sua gestão unificada ou centralizada. É este problema que o *Carrier Ethernet* também quer resolver: se hoje é importante ter em conta o conjunto fornecedor de 'serviço + hardware envolvido', no futuro, usando esta nova tecnologia, já não será assim tão importante ter esses factores em conta podendo-se até fazer uma abstracção dos mesmos.

- ***Carrier-class OAM [Operational, Administration and Maintenance]***

Estas capacidades serão integradas nos actuais modelos operacionais dos *Service Providers* existentes o que leva claramente a um aumento das capacidades considerando o que existe na actualidade. Os serviços *Carrier Ethernet* têm tendencialmente um largo alcance geográfico chegando, conseqüentemente a milhares de clientes. Desta forma são necessários

mecanismos OAM sofisticados, o que não se apresenta como um problema pois o *Carrier Ethernet* deve incorporar a criação de serviços e técnicas de gestão superiores às da *Ethernet* actual.

- ***Rapid Provisioning***

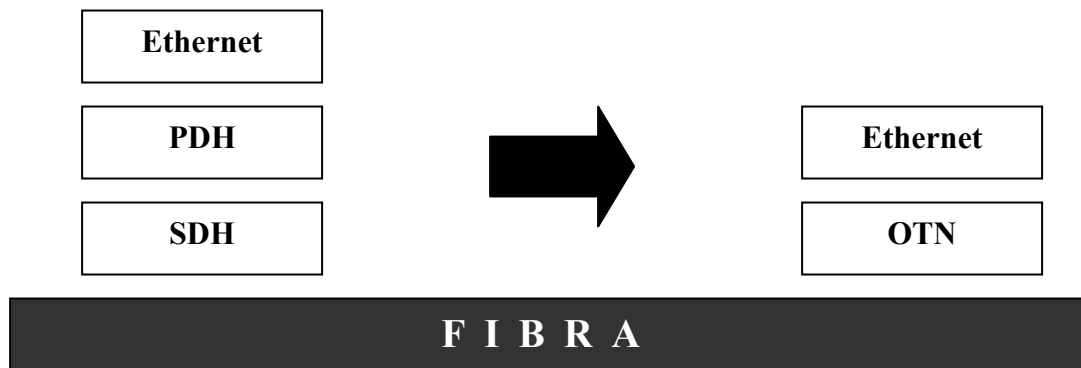
O *Carrier Ethernet*, ao desejar ganhar adeptos, tem de possuir a capacidade de fornecer novos serviços de *Ethernet* de uma forma rápida. Esta capacidade é conseguida através de três pontos essenciais:

1. Permitindo aumentos granulares em termos de largura de banda para os serviços existentes. Desta forma cada serviço tem a largura de banda necessária não havendo portanto desperdícios da mesma. Na verdade, com isto consegue-se uma gestão cuidadosa da largura de banda total disponível. Esta questão leva naturalmente ao ponto seguinte.
2. Adição de novos serviços cada um com um desempenho assegurado. Parece natural que da poupança de largura de banda obtida no ponto anterior, é possível ter largura de banda suficiente para poder oferecer novos serviços. Claro que ao oferecer esses novos serviços é imperativo assegurar uma qualidade minimamente aceitável (o conceito de ‘qualidade aceitável’ dependerá, naturalmente, do serviço em causa).
3. Capacidade de permitir esses serviços remotamente.

## **2.4 Razões da Rede Carrier Ethernet**

Nas actuais redes, as ligações são inefficientes por não possuírem a capacidade de optimizar a gestão da largura de banda. As aplicações, actualmente, tendem, como já se teve

oportunidade de ver, a funcionar através da troca de pacotes. O uso da Ethernet poderá possibilitar a compactação do número de camadas a atravessar para chegar à camada física (figura 2.8) sendo de esperar, com isso, uma maior facilidade de implementação e uso das aplicações referidas. Uma das hipóteses possíveis encontra-se ilustrada na figura seguinte.



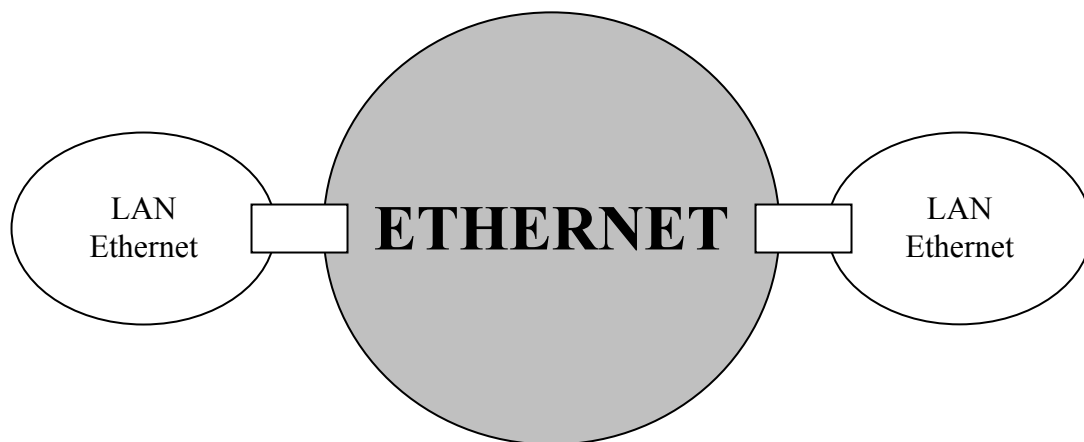
**Figura 2.8 A passagem de Ethernet para rede de transporte**

Usando uma tecnologia baseada em *Ethernet*, simplifica-se a questão dos recursos humanos pois estes, tendo já experiência nesta tecnologia, não necessitam de um treino específico de raiz para uma tecnologia completamente nova. Note-se que a *Ethernet* é uma tecnologia que se pode dizer madura ou seja, já tem muitos anos de estudo com as consequentes actualizações e correcções de erros. Investir num outro modelo que ainda estivesse em projecto ou mesmo em desenvolvimento poderia levar a um atraso na implementação prática de uma rede de transporte que solucionasse os problemas anteriormente descritos. Associando isto ao facto do mercado de *Ethernet* ser um mercado de grande escala, resulta uma diminuição de custos.

A poupança em termos económicos é outro ponto forte favorável ao *Carrier Ethernet*. Os *Service Providers* gastam, segundo [6], em média 60% a 80% dos seus orçamentos em OPEX (*Operational Expenditures*) e esses gastos, com o uso do *Carrier Ethernet* podem ser reduzidos, também segundo [6], em cerca de 23%, o que é uma poupança considerável. Ora, é

de esperar que à medida que as capacidades da rede aumentam (atendendo também às exigências do mercado) as redes tendam a ficar maiores e consequentemente com valores de OPEX mais elevados. Desta forma, ao usar o *Carrier Ethernet*, a poupança por parte dos *Services Providers* cresce paralelamente ao aumento das despesas operacionais. Além disso a tendência natural de qualquer tecnologia (que deseje ser competitiva) é amadurecer e ficar progressivamente mais eficiente. Não será portanto de admirar que a percentagem de poupança atrás referida venha também a aumentar com o tempo. Serão ainda possíveis mais poupanças se utilizados os padrões de OAM (*Operational, Administration and Maintenance Standards*).

A elevada popularidade das interfaces de Ethernet (95% da quota de mercado, segundo [1] e [7]), leva a que a transmissão de dados se torne muito mais fácil com o uso de uma rede de transporte baseada em Ethernet. Evitam-se assim conversões de protocolos, o que acarreta poupança, nomeadamente nos conversores. Adicionalmente muitas aplicações estão a ser transferidas para plataformas baseadas em Ethernet. De facto, grande parte do tráfego começa ou acaba numa porta Ethernet (figura 2.9). Finalmente o crescimento de aplicações como VoIP (voice over Internet Protocol) e o aparecimento de IPTV (Internet Protocol television) acarretam o aumento dos custos. O uso de uma rede de transporte baseada em Ethernet poderá assim simplificar as redes levando a consequentes poupanças em termos económicos.



**Figura 2.9 Grande parte do tráfego começa ou acaba numa porta Ethernet**

## 2.4.1 Características da Rede Carrier Ethernet

### 2.4.1.1 Escalabilidade

Quando se fala em passar a tecnologia de Ethernet das LAN's para, por exemplo, uma rede de um *Service Provider*, uma diferença que ressalta imediatamente é a questão da escala. Numa rede de um *Service Provider* existem usualmente 100 vezes mais utilizadores finais do que numa LAN (consequência de uma maior área geográfica) o que leva a que, consequentemente, exista um aumento exponencial das ligações. Desta forma, para resolver esta questão, a solução *Carrier Ethernet* passa por dimensionar a rede através de varias dimensões ao mesmo tempo:

- a) Uma rede de um *Service Provider* deve ser capaz de suportar milhões de serviços de *Ethernet* com uma qualidade de serviço (QoS) apropriada (o conceito de 'apropriada' dependerá dos serviços em causa). Isto decorre do facto de uma rede de um *Service Provider* poder ter ao seu encargo milhões de clientes;
- b) Os serviços podem atravessar as redes de acesso [*Access Carrier Ethernet*], as redes metropolitanas [*Metro Carrier Ethernet*] e até as redes nacionais e globais (figura 2.10), envolvendo consequentemente um elevado número de distâncias e uma grande variedade de infra-estruturas físicas existentes (*Ethernet*, *WiFi*, *WiMax*, etc);
- c) No *Carrier Ethernet*, as aplicações actuais e emergentes que suportam negócios, informação e aplicações de lazer irão beneficiar da convergência de voz, dados e vídeo;





**Figura 2.10 Alcance do *Carrier Ethernet***

Através deste parâmetro pretende-se obter uma capacidade de coexistência num mesmo serviço de várias aplicações com características diversas; proceder ao acesso através das mais variadas infra-estruturas implementadas pelos diversos fornecedores e obter a escalabilidade da largura de banda desde 1Mbps a 10Gbps e além.

A largura de banda pode ser escalada de 1M a 10G com incrementos granulares de 1M. Ora isto é uma grande vantagem relativamente ao que existe actualmente. Por um lado, dados os reduzidos incrementos, os utilizadores finais têm a possibilidade de pagar exactamente aquilo que desejam (11M, 15M, 79M só a título de exemplo) o que permite não desperdiçar largura de banda. Ou seja, se um cliente quer uma largura de banda de 79M recebe essa largura e paga por essa largura. Considerando a existência de vários clientes, se cada um receber exactamente aquilo que deseja, e não mais, há possibilidade dos *Service Providers* poderem poupar largura de banda e consequentemente poderem acomodar mais clientes. Assim os *Service Providers* poderão inclusivamente aumentar as receitas. Consegue-se desta forma uma vantagem para ambas as partes.

### 2.4.1.2 Fiabilidade

O *Carrier Ethernet* tem de possuir a capacidade de detectar qualquer falha (quer seja a nível físico como na camada de Ethernet) de uma forma rápida e remota. Há actualmente, de facto, um crescente número de aplicações que exige uma mais eficaz detecção e correcção de erros. Mais concretamente deverão ser obedecidos os seguintes três pontos:

- **Serviços com resiliência:** quaisquer falhas são localizadas e não terão impacto noutras aplicações ou clientes. A ocorrência de uma falha tem de ser imediatamente localizada e corrigida através do uso de ferramentas que minimizem tanto os incómodos no utilizador final como as despesas operacionais do *Service Provider*;
- **Protecção:** é fornecida protecção extremo-a-extremo contra qualquer falha na infra-estrutura utilizada para fornecer os serviços. Esta protecção refere-se tanto às falhas no caminho percorrido pela informação como às falhas de um nó (respeitante a um equipamento) da rede;
- **Restauro:** o *Carrier Ethernet* proporciona tempos de restauro (a falhas) tão bons ou mesmo melhores que os existentes no SONET (50ms);

## 2.5 Problemas do *Carrier Ethernet*

Para aplicar os serviços *Carrier Ethernet*, um dos problemas reside na implementação das redes *Carrier Ethernet*. Como já se viu, a Ethernet foi pensada e projectada para LAN's, redes pequenas, no seu geral. Consequentemente está preparada para suportar de uma forma eficiente tráfego *multicast* e *broadcast*. Isto já não ocorre com as tecnologias da camada 3 em que esse tipo de tráfego usa múltiplas ligações ponto-a-ponto. Desta forma o uso de mecanismos de *flooding* em LAN's manifesta-se eficaz para *multicasting* mas o mesmo não

acontece com MAN's e WAN's. De facto nestes casos o uso de *flooding* pode acarretar um elevado desperdício de largura de banda nomeadamente quando os pontos remotos da rede se encontram distantes em termos geográficos e o tráfego não se destina necessariamente aos seus portos locais. Assim sendo, técnicas como *Spanning Tree Protocol* (STP) e as suas variantes, tal como são conhecidas actualmente, não são adequadas para redes de elevada dimensão como já se viu ser do caso das redes que se pretende que sejam baseadas em *Carrier Ethernet*. Caso se usem essas técnicas o tempo de restauro da rede em caso de falha pode ir dos segundos aos minutos, dependendo obviamente da dimensão da rede em causa. Como o *Carrier Ethernet* é muito sensível aos tempos de restauro (em virtude de poder suportar aplicações críticas) tempos dessa ordem de grandeza são simplesmente inaceitáveis.

Existe, presentemente, uma crescente necessidade do uso das redes de telecomunicações tanto a nível residencial como, e principalmente, a nível empresarial. De facto a ligação 'ao Mundo' através das redes tornou-se uma necessidade por se ter mostrado ser uma mais valia, fomentadora do aumento de rendimentos/rentabilidade. Desta forma as redes não se podem ficar pelas reduzidas LAN's: é necessário estender às MAN's e WAN's. Esta extensão acarreta dificuldades extra pois distribuir serviços através delas é substancialmente diferente do que acontecia com as LAN's, nomeadamente em termos de complexidade (número de clientes e sua distribuição geográfica) e diversidade (de clientes e de tráfego, por exemplo). Superar estas dificuldades manifesta-se um desafio.

Por outro lado, começam a surgir novos serviços para as redes com um elevado nível de exigência quanto aos recursos necessários (sendo a largura de banda o mais óbvio). Dentro desses serviços os que mais se destacam são, pelas suas características, o IPTV (vídeo através de redes IP) o VoIP (voz através de IP – *voice-over-IP*). Neste sentido, e num mercado crescentemente competitivo, os operadores querem ter uma rede de transporte capaz de fornecer serviços de voz, vídeo e dados de uma forma eficiente (fiável) e económica. A Ethernet está assim a afirmar-se rapidamente como um candidato credível à rede de transporte. No entanto, antes que a tecnologia de Ethernet possa ser aplicada às redes de transporte, é necessário que seja capaz de suportar múltiplos serviços com uma qualidade pelo menos igual

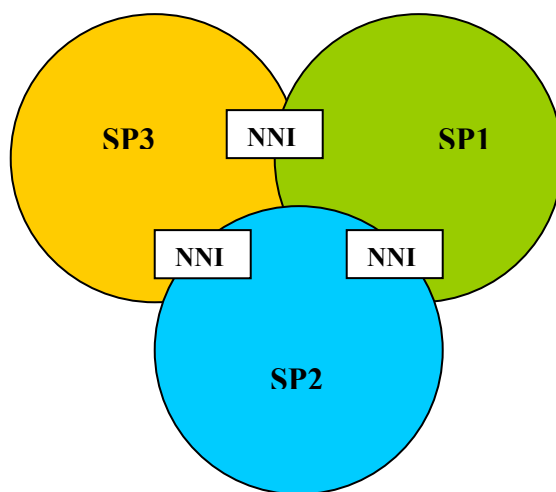
à qualidade fornecida pelas actuais redes de transporte. Só assim se torna atractiva, tanto por parte dos clientes mas principalmente por parte dos *Service Providers*, uma mudança de tecnologia.

Outra questão que pode ser levantada é a da distribuição do *Carrier Ethernet* enquanto nova tecnologia de transporte. Se é verdade que a Ethernet, como se teve oportunidade de ver, trás inúmeras vantagens sobre as outras redes de transporte também é verdade que a sua disponibilização pode conter algumas barreiras.

A fibra óptica é o canal de comunicação, por excelência, das novas redes devido à sua capacidade de acomodar elevados ritmos de transmissão. O *Carrier Ethernet*, ao ser suportado por fibra óptica, encontra-se limitado às regiões/edifícios onde a fibra já esteja instalada. Regiões afastadas dos grandes centros metropolitanos e/ou edifícios antigos não possuem fibra instalada. Este facto limita o acesso ao *Carrier Ethernet* por parte, por exemplo, de PME's, que constituem grande parte do mercado empresarial. Por outro lado, várias empresas têm módulos (p.e escritórios e unidade fabril) espalhados geograficamente podendo acontecer que cada módulo seja servido por um *Service Provider* diferente. Nesse caso pode acontecer que nem todos os *Service Providers* disponibilizem o *Carrier Ethernet*. Pode inclusivamente acontecer que nem todas as localizações tenham fibra óptica instalada. A respeito deste exemplo, é relativamente comum, em Portugal, uma empresa ter o seu módulo de produção no interior norte e os seus escritórios (sede) em Lisboa. Para empresas deste tipo o *Carrier Ethernet* só se torna atractivo se todos os seus módulos poderem ser ligados pela mesma tecnologia.

É igualmente importante a normalização, que ainda se encontra num estágio inicial, apesar dos muitos esforços que têm vindo a ser feitos. Neste campo, um dos pontos mais importantes é a interface entre as redes da responsabilidade dos vários *Service Providers* (**NNI – Network to Network Interface**). O NNI (figura 2.11), ao definir as fronteiras entre *Service Providers*, é um ponto essencial para a globalização do *Carrier Ethernet*, ou seja, para que esta tecnologia seja transversal a todas as redes (Acesso, Metropolitanas, Nacionais e

Globais). Este aspecto tem, portanto, de ser claramente definido para que o *Carrier Ethernet* seja aplicado às redes de transporte.



**Figura 2.11** Ligação entre vários Service Providers (SP)

Existe também um certo receio por parte dos clientes em migrar para o *Carrier Ethernet*, apesar de reconhecerem o valor desta tecnologia. Os clientes estão demasiado habituados e familiarizados com as tecnologias anteriores e temem não ter acesso a serviços aos quais estão acostumados e que consideram importantes. Os pontos mais importantes são a falta de SLA's e de capacidades de OAM. As características do *Carrier Ethernet* permitem suportar de maneira confiável serviços críticos. Por este motivo é importante que seja assegurado o transporte de informação segundo SLA's rigorosos. A inexistência desses requisitos no *Carrier Ethernet* está a atrasar a sua adopção. Outro ponto é a questão dos OAM's. As redes são de grande dimensão e espera-se que o *Carrier Ethernet* esteja disponível para um elevado número de utilizadores finais. Os *Service Providers* têm, deste modo, de fornecer serviços adequados conseguindo uma margem de lucro que torne a prestação do serviço rentável. Desta forma o CAPEX adquire importância mas principalmente o OPEX, que deve ser reduzido ao mínimo. A inexistência de ferramentas sofisticadas de gestão dos serviços de Ethernet está, também, a atrasar a adopção desta tecnologia.

Finalmente a questão dos custos. Já se teve oportunidade de verificar que o *Carrier Ethernet* traz benefícios neste campo tanto para os utilizadores como para os *Service Providers*. No entanto, também se teve oportunidade de ver que ainda existem alguns estudos a fazer para tornar o *Carrier Ethernet* uma realidade. Estas circunstâncias tornam difícil projectar qual o preço a cobrar pelo *Carrier Ethernet* e respectivos serviços.

O exponencial crescimento das redes, com claras implicações em termos de necessidade de largura de banda, associado à grande popularidade da Ethernet (nomeadamente nas LAN's) e ao tipo de tráfego que se está a popularizar (dados ao invés de voz) leva a acreditar que esta tecnologia é a melhor solução para suportar o *Carrier Ethernet*. Isto apesar da maturidade e do nível de desenvolvimento de outras tecnologias. No entanto, está a tornar-se claro que nem mesmo a Ethernet, no seu actual nível de desenvolvimento, tem capacidade para suportar o *Carrier Ethernet*.

## 3 IPTV Móvel

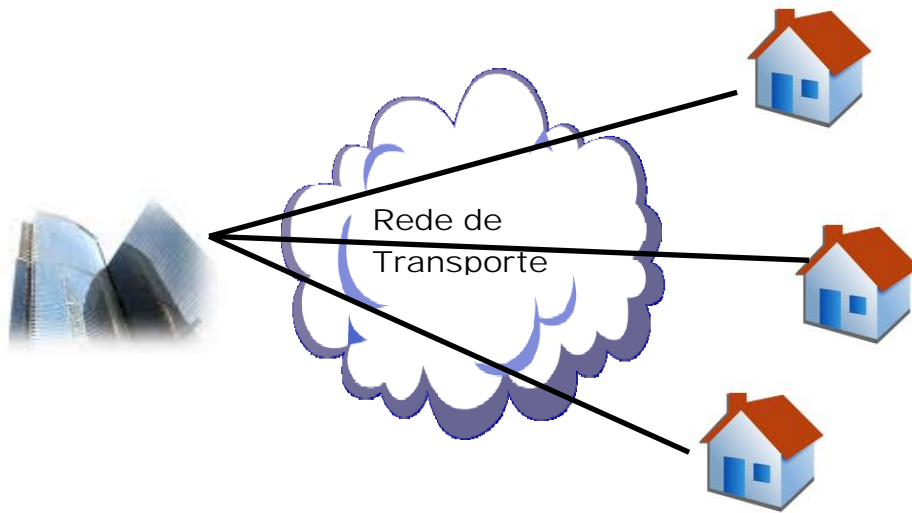
### 3.1 Introdução

Na área das redes e serviços associados verifica-se uma mudança de paradigma: os operadores deixaram de pensar somente na sua área inicial para se aventurarem noutras áreas. Esta mudança verificou-se em menos de dez anos. Em Portugal, por exemplo, os operadores de telefonia fixa deixaram de se dedicar exclusivamente a esse tipo de produto (no qual se foram especializando ao longo dos anos) para se dedicarem também a televisão e Internet. Um outro exemplo é o caso dos operadores de redes móveis que, de um serviço inicial unicamente de telefonia de voz (móvel), passaram a incluir nos seus serviços telefonia de vídeo e TV baseada em redes IP (IPTV).

Como já foi referido, existe um crescente número de aplicações/serviços que, em virtude da sua natureza (serviços de saúde, finanças, etc), possuem um elevado grau de exigência quanto aos recursos necessários. Um desses serviços é o IPTV, que possibilita um maior grau de interacção com o utilizador. No entanto a sua generalização não se afigura simples pois muitos dos suportes que se pretende que possuam esse serviço não foram projectados para o transporte de vídeo. Como exemplo tem-se as redes móveis que foram pensadas para o transporte de tráfego de voz mas que a experiência diária diz que está progressivamente a integrar serviços multimédia. Essas ligações são (figura 3.1), contudo, do tipo ponto-a-ponto (unicast) o que poderá levar a um aumento da largura de banda com o aumento do número de clientes, dependendo do tipo de tráfego em causa. Note-se que no caso do tráfego vídeo podem-se ter, basicamente, dois tipos de tráfego:

1. A pedido (*on demand*): o utilizador pede para ver determinado conteúdo (por exemplo um filme);

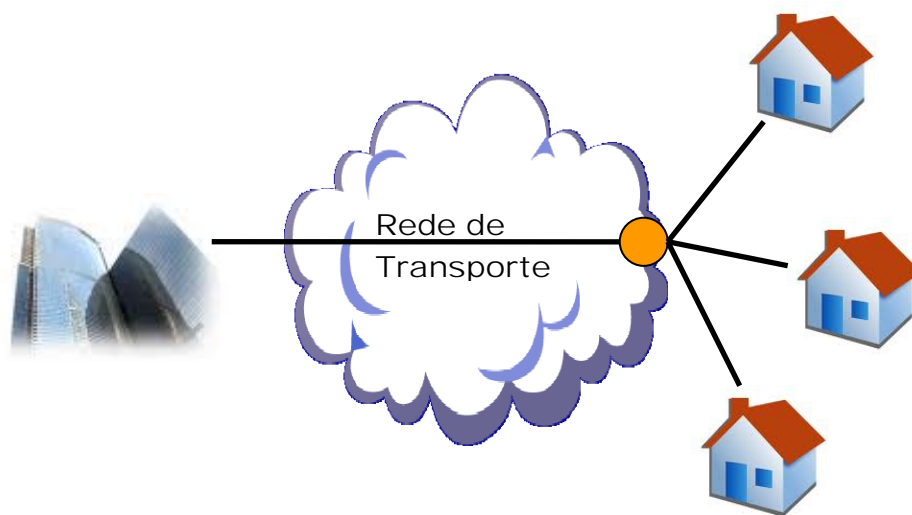
2. Difusão: o utilizador sabe que o conteúdo que deseja ver vai ser transmitido num determinado horário e espera pela hora para o poder ver.



**Figura 3.1 Rede com ligações ponto-a-ponto**

Nas redes móveis já referidas, por existirem ligações ponto-a-ponto, existe uma largura de banda dedicada para cada ligação. Esta abordagem pode acarretar, portanto, uma ineficiência em termos de gestão de largura de banda. Por outro lado, e atendendo a que os operadores, ao rivalizarem entre si, querem oferecer o maior número de canais possível aproveitando ao máximo a capacidade disponível, a rede necessita ser bem dimensionada.





**Figura 3.2 Rede com ligações ponto-multiponto**

Este problema levou ao desenvolvimento de tecnologias de multicast (figura 3.2). Existem, no entanto, estudos que mostram que a melhor solução para a poupança de recursos é aquela que, ao invés de usar só multicast, usa também unicast.

De facto, o factor económico está sempre presente, pelo que é desejável poupar em recursos da rede sem restringir a gama de canais disponíveis para o cliente escolher. A coexistência do transporte em unicast e em multicast de modo a se conseguir combinar as vantagens de ambas as tecnologias é, por isso, importante.

Conforme se tem vindo a dizer ao longo deste trabalho, existe um crescente uso das redes nomeadamente as redes móveis. Os serviços de voz já têm uma grande popularidade e os serviços de dados e vídeo começam agora a adquirir uma significativa importância, levando ao consequente aumento do tráfego em redes móveis. É, portanto, necessária por um lado mais largura de banda e, por outro, uma melhor gestão da largura de banda existente. As tecnologias que têm sido usadas até ao momento (TDM e ATM) já não são capazes de acompanhar essas exigências. Por esse motivo a nova geração de redes móveis está a migrar os serviços para Ethernet, devido à conhecida flexibilidade desta tecnologia. Num futuro próximo espera-se que a tecnologia de transporte *Carrier Ethernet* se expanda de tal forma que permita a conectividade mesmo em locais onde as antigas tecnologias de transporte sejam claramente

dominantes. Uma consequência imediata é a possibilidade de escolha, por parte dos operadores, da tecnologia a usar.

A Ethernet, além da sua flexibilidade, permite a rápida transferência de controlo entre as estações pertencentes às redes móveis. Por outro lado, os circuitos nucleares de uma rede baseada em Ethernet exigem requisitos de desempenho muito apertados que têm de ser suportados pela arquitectura da própria rede por forma a reduzir ao mínimo o número de saltos numa ligação (numa chamada telefónica por exemplo). Para alcançar essas exigências as redes móveis de *backhaul* devem ter o mesmo nível de protecção (comutação de caminho, de vão e de anel) que as redes baseadas nas tecnologias anteriores

Neste sentido, existindo claramente exigências que têm de ser cumpridas nas redes móveis, o MEF identificou os pontos que devem ser seguidos (por parte dos operadores) para uma correcta e eficiente aplicação da tecnologia *Carrier Ethernet* às redes móveis.

### **3.2 IPTV**

O IPTV, de uma maneira geral, é uma tecnologia que permite a convergência de serviços de telecomunicações e de difusão usando, para tal, redes de IP de banda larga com uma qualidade de serviço controlada (controlável) que permita a entrega desses serviços de um modo seguro. Estas redes podem ser tanto físicas (através do uso de cabos) como sem fios. Os serviços a convergir serão tão diversos como vídeo, áudio e dados. Apesar do nome esta tecnologia não se encontra limitada às televisões pois pode ser usada, também, em computadores, PDA's, telemóveis, etc.

Através desta tecnologia, abrem-se novas oportunidades de negócio em quatro áreas distintas: conteúdos, serviços, redes e clientes.

- **Conteúdos:** a convergência de vídeo, áudio e dados referida anteriormente, ao rentabilizar a largura de banda existente possibilita a criação de novos conteúdos, sejam eles de vídeo, áudio, dados ou outras aplicações. Esta situação abre caminho a novos *Contents Providers*: entidades responsáveis pela criação de conteúdos e com direitos sobre conteúdos. Desta forma, sob o ponto de vista dos *Contents Providers* IPTV confunde-se com os próprios conteúdos multimédia, incluindo os multimédia interactivos (por exemplo vídeo).
- **Serviços:** aumentando o número de conteúdos, é necessário receber esses conteúdos, processá-los e transmiti-los com segurança. Este processamento faz com que os conteúdos cheguem aos clientes como com valor acrescentado. No campo da segurança, o seu conceito depende do *Service Provider* em causa e do tipo de serviços que deseja divulgar aos seus clientes. Na expectativa de aumentar os seus lucros e assegurar a sua subsistência, os *Service Providers* vêem o IPTV como uma oportunidade de rentabilizar o seu negócio, oferecendo não só os tradicionais serviços (TV, Internet e telefonia) mas também serviços interactivos, personalizados e com uma elevada qualidade. É possível, desta forma, aumentar os lucros por cliente.
- **Redes:** uma vez processados os conteúdos é necessário que estes sejam geridos e enviados com segurança através de redes IP de banda larga com uma qualidade de serviço controlável. Essas actividades são efectuadas pelos *Network Providers* que são as entidades que efectuam a ligação entre os *Service Providers* e os clientes e são responsáveis pelas camadas de transmissão de *core*, distribuição e acesso.
- **Clientes:** partindo da geração dos conteúdos, chega-se agora aos clientes que os podem ter disponíveis nas suas televisões, computadores, PDA's ou telemóveis. Sob o ponto de vista dos clientes, o IPTV não se resume somente à qualidade resultante da convergência dos serviços de telecomunicações e de difusão pois pode adquiri-los, também simultaneamente, pelas maneiras tradicionais. O mais

importante é o serviço ubíquo pois o que cativa o cliente é ter os conteúdos em qualquer altura e em qualquer lugar.

### **3.3 Expansão do IPTV**

Através do IPTV móvel é possível usufruir da tecnologia IPTV em qualquer lugar e mesmo em movimento. É importante perceber quais são os benefícios e as desvantagens do IPTV móvel e é esse tema que se vai abordar nesta secção.

O ITU-T FG IPTV (*ITU-T Focus Group on IPTV standardization*) definiu a tecnologia IPTV como uma tecnologia de acesso agnóstica que pode, portanto, ser usada por várias redes sem fios: WLAN, Cellular, etc. Desta forma as características particulares de cada tipo de redes sem fios terão de ser tidas em conta no desenvolvimento do IPTV móvel. Por outro lado, actualmente qualquer pessoa pode criar os seus próprios conteúdos e divulga-los para os utilizadores de redes móveis de IPTV. Isto tenderá a criar um maior volume de tráfego com grande diversidade e elevada dinâmica e portanto terá de ser tido em conta.

Existe a ideia que a televisão em rede é o futuro da TV. No entanto, tal como já foi dito, o IPTV é uma tentativa das empresas de telecomunicações aumentarem as suas receitas.

#### **3.3.1 Limitações do IPTV móvel**

Há dois grupos de obstáculos à completa implementação do IPTV: técnicos e económicos.

- **Obstáculos técnicos**

Uma vez que o IPTV móvel necessita pelo menos uma ligação sem fios (entre a origem e o destino), os principais obstáculos encontram-se relacionados com as questões técnicas.

A maioria dos terminais sem fios possui uma capacidade de tráfego (2 – 3 Mbps) inferior à capacidade dos terminais fixos. Este facto limita a portabilidade do sistema IPTV uma vez que implica um baixo processamento e uma baixa capacidade de armazenamento de informação. Como consequência de todos estes requisitos, apenas um pequeno número de tecnologias pode suportar IPTV.

A largura de banda nas redes sem fios é outro obstáculo técnico. É verdade que esta tem vindo a aumentar mas ainda não o suficiente para conseguir suportar tráfego com uma qualidade de alta definição. Espera-se que este objectivo seja atingido nas redes de 4G. No entanto, mesmo nessa situação, há que ter em conta as elevadas necessidades de largura de banda que os conteúdos de elevada qualidade exigem. As redes sem fios terão, sempre, uma menor largura de banda que as redes baseadas em ligações físicas. Pelo que foi exposto, a (pouca) largura de banda existente tenderá a ser consumida rapidamente.

Existe ainda a vulnerabilidade associada às ligações móveis. Ainda que os terminais (de recepção e/ou emissão) permaneçam fixos, as modificações do meio circundante podem afectar a transmissão do sinal. Veja-se o exemplo de uma rede de transmissão a transmitir para um determinado receptor. Pode acontecer que, de repente, seja construído um prédio que bloqueie o caminho efectuado pelo sinal. Nesta circunstância haverá reflexões, interferências no sinal, atrasos de propagação e perdas de pacotes (situação inevitável em ligações sem fios). No entanto as ligações móveis tendem a ser altamente dinâmicas quando comparadas com as ligações fixas, o que leva a que as características das ligações sem fios sejam alteradas por vezes de forma abrupta. Existem diversos motivos que levam a essa elevada dinâmica (interesse momentâneo em determinado serviço oferecido, por exemplo)

Como já se teve oportunidade de ver, um dos pontos cativantes do IPTV é a ideia de ter acesso aos mais variados serviços (Internet, Televisão, telefonia, etc) em qualquer lugar e em qualquer altura. No entanto é praticamente impossível ter uma cobertura

verdadeiramente global, sem que haja nenhuma zona morta, o que acaba por limitar sempre o alcance geográfico e portanto o acesso a todos os serviços.

- **Obstáculos económicos**

No que diz respeito aos obstáculos económicos, encontra-se a necessidade que os consumidores têm de utilizar IPTV móvel. Acontece que essa necessidade dos consumidores verem programas de televisão enquanto viajam (por exemplo) não é assim tão elevada. Na sociedade ocidental as pessoas não dispõem de tempo suficiente para usufruir de tais serviços. Desta forma, para atrair potenciais clientes é necessário oferecer muito mais serviços do que aqueles que os consumidores contam.

Por outro lado, assistir aos programas favoritos em directo está a deixar de ter tanta importância para os clientes devido à grande diversidade de canais que têm ao seu dispor. São necessários, então, conteúdos específicos para serem visualizados em dispositivos móveis. Esses conteúdos terão de se encontrar adaptados aos dispositivos móveis: dimensão de exibição reduzida e tempos de duração curtos.

### **3.4 Cenário alvo**

Ir-se-á agora, considerar um cenário concreto para estudo (figura 3.3). Esse cenário será uma rede móvel de IPTV, que já foi aludida no início deste capítulo. Neste cenário o operador pode escolher divulgar em multicast os canais mais populares e os restantes por unicast, ou seja, individualmente.

Este tipo de serviços ainda não disponibiliza um elevado número de canais devido à tecnologia base. Espera-se poder usar o conceito de *Carrier Ethernet* desde a ‘origem’ dos canais até aos emissores que, de acordo com a popularidade individual de cada canal, os vai transmitir para os utilizadores finais.

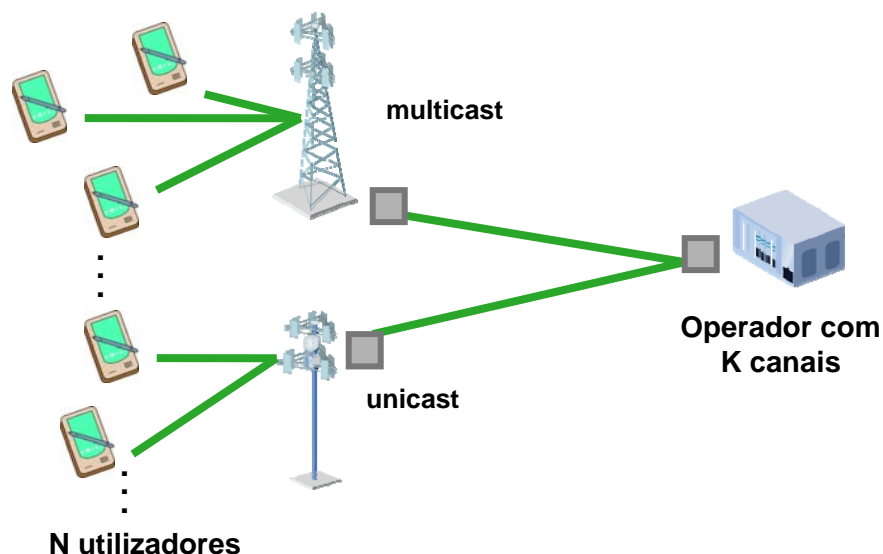


Figura 3.3 Cenário alvo: rede móvel de televisão [8]

### 3.5 Exigências

As redes rádio de acesso (2G a 4G) impõem requisitos (elevada largura de banda e escalabilidade) para o núcleo das redes, o que leva a que também limitem o tipo de serviços que podem estar disponíveis nessas mesmas redes. Torna-se então necessário implementar classes de serviço com prioridades distintas para que se possam ter os serviços a funcionar com as características actuais das redes. Naturalmente os serviços de telefonia, qualquer que seja a tecnologia usada, terão de ter uma maior prioridade. Um cliente não compreenderia e/ou aceitaria chamadas com uma elevada latência (somente a título de exemplo). *Streaming* de vídeo aparecerá no segundo lugar, seguido de serviços interactivos e finalmente os não interactivos.

<b>Classes de serviço</b>	<b>Características</b>
<b>Telefonia (voz)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Conversação em tempo real</li><li>- Preservação de uma variação temporal entre as (duas) entidades participantes no fluxo de informação: a variação deve ser rigorosa e baixa.</li></ul>
<b>Streaming de vídeo</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- <i>Streaming</i> em tempo real</li><li>- Preservação de uma variação temporal entre as (duas) entidades participantes no fluxo de informação</li></ul>
<b>Serviços Interactivos</b> (ex.: navegação web)	<ul style="list-style-type: none"><li>- Tráfego Interactivo do tipo <i>best effort</i></li><li>- Padronização do sistema Pedido-Resposta</li><li>- Preservação da carga paga</li></ul>
<b>Serviços Não Interactivos</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Tráfego de <i>background</i> do tipo <i>best effort</i></li><li>- O destino está à espera de nova informação em intervalos de tempo bem definidos.</li><li>- Preservação da carga paga</li></ul>

**Tabela 3.1 Características das Classes de Serviço ([14], adaptado)**

Uma rede móvel implica que o cliente, ao deslocar-se, possa ter sempre ligação à rede. Isto exige (conforme foi previamente referido) que as estações base da rede móvel que possuem o controlo da ligação vão variando conforme a própria localização do cliente. Para que a ligação não sofra ‘cortes’ é necessária uma sincronização precisa entre as várias estações base e o cliente.

Nunca pode ser esquecido, contudo, que existem tecnologias a ser usadas, actualmente, nessas redes, pelo que a transição não pode (ou pelo menos não deve) ser brusca. Pelo contrário, a transição para uma rede móvel baseada em *Carrier Ethernet* deve ter em conta o legado das tecnologias anteriores. Caso isso não aconteça existe o risco da nova tecnologia não ser tão valorizada e/ou implementada como se planeava.

As redes móveis podem assumir as mais diversas formas dependendo estas de factores tão diversos como preferências dos operadores, questões geográficas, tecnologias de transporte a usar ou ainda normas a cumprir para as redes móveis. Este estudo focar-se-á na rede que liga as estações de controlo das redes de acesso de rádio às estações base (figura 3.4).



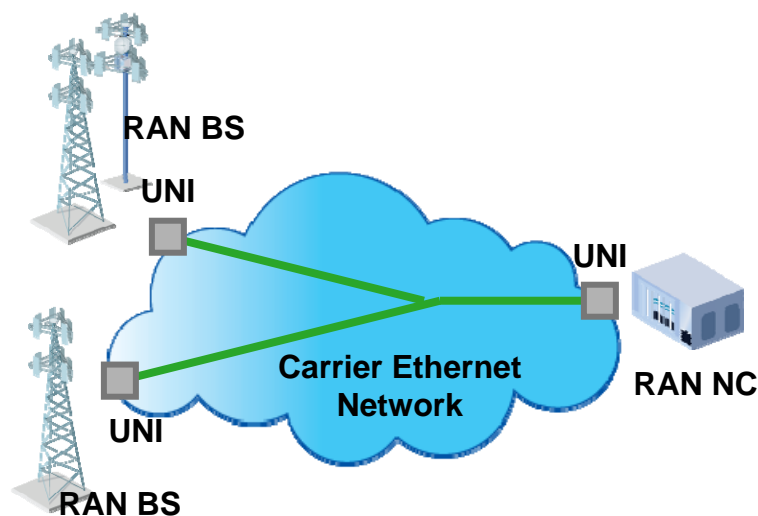


Figura 3.4 Cenário alvo (simplificação)

Na figura anterior, as estações de controlo das redes de acesso de rádio são designadas por RAN NC (Radio Access Network, Network Controller) e as estações base são designadas por RAN BS (Radio Access Network, Base Station). Estas duas estações podem ser designadas indiferenciadamente por RAN CE (Radio Access Network, Customer Edge).

Existem dois cenários principais. No primeiro cenário assume-se que as interfaces das estações não estão preparadas para o uso da Ethernet e portanto não podem ser ligadas directamente aos UNI's (User's Network Interface) pelo que é necessário um módulo GIWF (Generic Inter-working Function) que permita converter Ethernet numa outra tecnologia suportada pelas interfaces. Este será o caso das redes que possuam equipamento mais antigo que, naturalmente, não estará preparado. Por outro lado, as redes mais recentes já terão equipamento mais moderno, com interfaces preparadas para o uso de Ethernet. Isto leva ao segundo cenário que é aquele em que as interfaces das estações estão preparadas para Ethernet podendo ser ligadas directamente aos UNI's, evitando-se o conversor atrás referido.

Dentro de cada um destes cenários há duas outras hipóteses: a rede pode suportar as tecnologias anteriores (que se afirma numa boa escolha para uma transição suave) ou, pelo contrário, suportar unicamente o *Carrier Ethernet*. O caso em que se tem a hipótese de suportar as tecnologias mais antigas tem particular importância para os operadores. Nesta situação, é possível transmitir tráfego de baixa prioridade das redes legadas na nova rede MEN de *backhaul*. Com isto é possível obter uma maior escalabilidade da rede global.

No seguimento do anteriormente referido, uma RAN NC pode ser composta por um único controlador (como no caso da figura 3.4) ou por mais. De igual forma uma RAN BS pode ter só uma estação ou várias. Independentemente do número de RAN NC ou RAN BS, todas se podem ligar à rede, em qualquer instante.

Normalmente este tipo de redes tem uma ou duas estações de controlo (de onde parte a informação a transmitir) e centenas a milhares de estações base, que irão transmitir a informação para os clientes. Em termos de largura de banda, uma estação base pode exigir desde poucos Mbps a centenas de Mbps. É assim compreensível que os serviços a usar nestas redes necessitem de ser escaláveis e flexíveis. Aqui o *Carrier Ethernet* apresenta vantagens (conforme as suas características, já apresentadas no capítulo 2 deste trabalho).

Conforme já foi abordado anteriormente, existem três tipos de serviços: E-Line, E-Lan e E-Tree. No caso E-Line têm-se ligações ponto-a-ponto (ver figura 2.3), pelo que este é um modelo simples de implementar. Os outros dois casos, por sua vez, já não são de implementação tão linear. Já no caso E-Lan têm-se ligações multiponto-a-multiponto (ver figura 2.4). Isto leva a que as estações base necessitem de comunicar entre si. Finalmente no caso E-Tree, têm-se ligações ponto-multiponto (ver figura 2.5). Nesta situação geralmente as estações base necessitam de comunicar (e trocar informação) apenas com a estação de controlo. A estação de controlo tem de estar configurada como router (raiz) e as estações base devem estar configuradas como *leaves*, ou seja, como extremos (ou terminais).

Como já se viu, é necessária a existência de diferentes classes de serviço nas redes móveis. Desta forma, as normas para as redes móveis descritas no 3GPP (3rd Generation Partnership Project) e no IEEE 802.16 identificam as diferentes classes de tráfego na interface rádio. No entanto nada é dito em específico relativamente à rede nuclear (backhaul), ou seja, precisamente à parte da rede que esta a ser alvo de estudo. Na sequência do que tem vindo a ser dito, serão necessárias, para além das classes respeitantes ao tráfego dos diferentes utilizadores, outras classes nomeadamente para efeitos de sincronismo (que já se viu ser de grande importância), controlo e sinalização entre as estações base e as estações de controlo, entre outros.

Torna-se, então, necessário saber o número de classes de serviço a usar. Regra geral, o número de classes de serviço que se usam está dependente do equipamento (e das suas recomendações) e das preferências do próprio operador. Em teoria não há número limite de classes de serviço, pelo que é possível associar uma classe diferente para cada tipo de tráfego. No entanto existem menos classes do que tipos de tráfego, sendo necessário limitar o número de classes e agregar tráfego que possua propriedades semelhantes. Desta forma o MEF recomenda, para o número de classes de serviço, um mínimo de duas e um máximo de quatro. Ter um número reduzido de classes de serviço permite simplificar as operações de gestão do tráfego.

Dentro de cada classe, os requisitos necessários devem ser suficientes para que o tráfego mais exigente tenha um comportamento adequado. Em tráfego crítico, tal como sincronização ou tráfego de tempo-real, dever-se-á definir uma classe única para este tipo de tráfego ou, como segunda hipótese, reservar uma classe de serviço com limites muito apertados para os atrasos das tramas e possíveis variações. O MEF recomenda que, numa MEN, se opte pela segunda hipótese, referida anteriormente.

<b>Classes de Serviço (CoS)</b>	<b>4 CoS</b>	<b>3 CoS</b>	<b>2 CoS</b>
<b>Prioridade</b>			
<b>Muito Alta</b>	Sincronismo	-	-
<b>Alta</b>	Conversação Sinalização Controlo	Sincronismo Conversação Sinalização Controlo	Sincronismo Conversação Sinalização Controlo <i>Streaming</i>
<b>Média</b>	Streaming de vídeo	Streaming de vídeo	-
<b>Baixa</b>	Interactivo e Não Interactivo	Interactivo e Não Interactivo	Interactivo e Não Interactivo

**Tabela 3.2 Divisão dos fluxos de informação com o número de CoS disponíveis ([14] e [18], adaptado)**

Os UNI's são de grande importância pois são eles que permitem as ligações das várias estações com as redes. As exigências dos diversos UNI's não são uniformes, em primeiro lugar porque se ligam a diversos tipos de estações, com propriedades específicas, o que requer exigências também específicas. Desta forma os UNI's (tanto do lado da rede, como do lado das estações) têm obrigatoriamente de estar concordantes com o UNI do tipo 2.1 definido pelo MEF 13.

Qualquer rede de telecomunicações (e em particular as redes móveis) requer um elevado grau de sincronismo. Isto é feito através de relógios primários de elevada precisão que permitem o sincronismo entre todos os elementos da rede.

Caso aconteça a precisão ser insuficiente ou se encontrar degradada, pode ocorrer a perda de sincronismo nos elementos da rede (estações base e de controlo) levando à perda de chamadas e à degradação da qualidade do serviço (por exemplo da qualidade da voz numa chamada de telefone). A sincronização pode ser feita através de frequência, fase e tempo.

A tecnologia de transporte Ethernet, ao ser assíncrona, não possui nenhum sistema de sincronismo. Sendo o sincronismo uma parte tão importante das telecomunicações, existem

vários organismos (ITU-T, a título de exemplo) a estudar este problema. Surgiram, entretanto, duas hipóteses para a sincronização neste caso (redes com comutação de pacotes).

### **1. Método da Ethernet Síncrona**

Neste caso, o tempo (ou a frequência) é distribuído ao nível da camada física, sendo que o sinal do relógio deve ser incorporado na linha de código. Com este método consegue-se uma sincronização muito precisa mas esta solução padece do problema de ser exigido em cada nó da rede para se ter um sincronismo global (extremo-a-extremo). Um outro problema deste método é a sua dependência do suporte físico da rede, uma vez que se baseia no nível da camada física. Não é, portanto, aplicável da mesma maneira a todos os suportes existentes.

### **2. Método baseado em pacotes**

Uma segunda solução consiste em distribuir o tempo (ou frequência) através de um fluxo dedicado de pacotes IP. Este método pode usar trocas de marcas temporais que serão usadas como suporte para a geração de frequência. Segundo [14], a comparação do tempo obtido pelas marcas temporais com o tempo gerado pelo oscilador local, permite recuperar uma frequência de referência do oscilador local (método de recuperação de relógio adaptativo)

Isto tem a vantagem de permitir um sincronismo independente da camada física o que leva a uma grande flexibilidade para operar com vários tipos de materiais: fibra, cobre, etc. Não é, no entanto, livre de problemas. Ao basear-se em comutação de pacotes, e tal como a restante informação, pode ter atrasos ou perda de pacotes. Estes atrasos podem condicionar a recuperação do relógio para efeitos de sincronismo. Para além disso, existem outros factores que podem colocar em causa a correcta recuperação do relógio de sincronismo, tais como as características do oscilador do GIWF.

Outra hipótese é o método diferencial, onde só se usa o tempo relativo indicado pelas marcas temporais do fluxo de pacotes previamente referido. Consegue-se assim obter um valor estimado para a fase (que está relacionada com a frequência). É assim possível uma frequência de referência.

## 4 Modelo Matemático

### 4.1 Introdução ao Modelo Matemático

Para efeitos de estudo ir-se-á considerar uma rede para um conjunto de canais de televisão. Desses canais,  $K$  irão ser oferecidos a um conjunto de utilizadores. Tipicamente um *Service Provider* fornece aos seus clientes um número de canais ( $K$ ) elevado. Este estudo será baseado nas referências [8], [9] e [10].

O termo multicast refere-se à entrega de informação a múltiplos destinos simultaneamente. Por outro lado, o termo unicast refere-se à entrega de informação a um único destino. Para haver a coexistência de unicast e multicast torna-se necessário saber a probabilidade de determinado canal ser seleccionado pelos utilizadores (distribuição probabilidade de popularidade).

Alguns estudos mostram que a probabilidade de um canal ser pedido por um utilizador segue a Lei de Zipf (referências [8] e [10]). Ir-se-á assumir, então, que pela referida lei, a probabilidade de um canal ser pedido é dada pela fórmula (4.1). Esta probabilidade está intimamente ligada com a popularidade do canal. Naturalmente um canal dito mais popular terá uma maior probabilidade de ser pedido (acontecendo o oposto no caso inverso).

$$\pi_k = \frac{d}{k^\alpha} \quad k=1,2,3, \dots, K \quad (4.1)$$

onde

$d$  Constante de normalização. O somatório de todas as probabilidades  $\pi_k$  é

igual a 1, ou seja,  $\sum_{k=1}^K \pi_k = 1$  donde, por (4.1), se obtém que  $d = \frac{1}{\sum_{k=1}^K \frac{1}{k^\alpha}}$

$k$  Identificador do canal. O canal mais popular é representado por  $k=1$  e o canal menos popular por  $k=K$ .

$\alpha$  Variável de Zipf

Está assim modelada a popularidade,  $\pi_k$ , do canal.

Falta agora modelar o comportamento dos utilizadores. Vai-se assumir que a actividade dos utilizadores se comporta como um processo de Bernoulli ([Anexo A.1]) e que os mesmos são independentes. Desta forma, os utilizadores podem-se encontrar em dois estados, cada um com uma determinada probabilidade associada: o estado activo (com uma probabilidade  $a$ ) ou o estado inactivo (com uma probabilidade  $1-a$ ).

Cada utilizador tem uma probabilidade associada à sua inactividade  $\pi_{u,0}=1-a$ . Irá considerar-se que o estado  $k=0$  indica um utilizador inactivo. Cada utilizador tem associado ainda um conjunto de probabilidades ( $\pi_{u,k}=a\pi_k$ ) que representam a probabilidade (em estado estacionário) do utilizador se encontrar activo ( $a$ ) e a requisitar o canal  $k$  ( $\pi_k$ ). Desta forma, o comportamento de cada utilizador pode ser modelado pela expressão (4.2), onde  $\Pi$  é um vector de dimensão  $K$  (número de canais disponibilizados aos utilizadores) composto por todas as probabilidades  $\pi_k$ .

$$\Pi_u = [1-a \mid a\Pi] \quad (4.2)$$

É de notar que, por (4.1),  $\sum_{i=1}^K \pi_i = 1$ , donde resulta de imediato que  $a \sum_{i=1}^K \pi_i = a$ . Desta forma

$$\sum_{i=1}^K \Pi_u(i) = 1-a + \sum_{i=1}^K \pi_i = 1-a+a=1.$$

## 4.2 Coexistência de Unicast e Multicast

Como já foi afirmado, podem existir vantagens em combinar o transporte em unicast e multicast. Cada uma destas tecnologias terá necessidade de determinados valores para os recursos que irá usar, nomeadamente a largura de banda e capacidade computacional. Vai-se assumir que um canal multicast consome mais recursos que um canal unicast. Defina-se  $\beta$



como a relação (quociente) entre o custo necessário para transportar um canal em multicast ( $c_m$ ) e o custo necessário para transportar um canal em unicast ( $c_u$ ). Este quociente irá ser considerado constante. Percebe-se de imediato que  $\beta = \frac{c_m}{c_u}$  pode variar desde 1 até um número infinitamente grande.

Resta, contudo, saber qual a melhor forma de coexistência, isto é, quais os canais a distribuir por multicast e quais os canais a distribuir por unicast. Para isso, defina-se, ainda,  $N$  como o número de utilizadores do sistema de televisão e  $C$  como um vector de dimensão  $K$  (número de canais oferecidos aos clientes) cujas entradas,  $c_k$  ( $k=1,2,3, \dots, K$ ), representam o número de utilizadores que se encontram sintonizados no canal  $k$ . Se  $c_1$  representar o número de utilizadores sintonizados no canal 1 (activos portanto),  $c_2$  o número de utilizadores sintonizados (e como tal activos) no canal 2, e assim por diante até  $c_k$ , então pode-se definir  $n_a$  como o número total de utilizadores activos. Uma vez que se assumem os  $N$  utilizadores como independentes, então  $n_a$  é uma variável aleatória com distribuição binomial ([Anexo A.2]),

$$n_a = \sum_{k=1}^K c_k . \quad (4.3)$$

Se  $N$  é o número total de clientes do sistema e  $n_a$  o número de clientes activos nesse mesmo sistema então, o número de utilizadores inactivos  $n_i$  é dado por

$$n_i = N - n_a . \quad (4.4)$$

Pretende-se, então, saber quantos clientes estão sintonizados em cada canal. Deseja-se, portanto, determinar, então, a probabilidade de ter  $b_1$  cliente sintonizados no canal 1,  $b_2$  clientes sintonizados no canal 2, e assim por diante. Ou seja, pretende-se determinar a probabilidade  $\omega_B = P[c_1=b_1, c_2=b_2, \dots, c_k=b_k]$ . Os valores  $b_k$  representam o número de utilizadores sintonizados (e portanto activos) no canal  $k$  ( $k=1,2, \dots, K$ ). O conjunto de todos os  $b_k$  forma um vector, de dimensão  $K$ , que se irá chamar de  $B$ .

Uma forma de obter a probabilidade  $\omega_B$  passa por determinar primeiro a probabilidade condicional  $P[c_1=b_1, c_2=b_2, \dots, c_k=b_k \mid n_a=n]$ . Esta probabilidade condicional significa que se pretende determinar a probabilidade de ter  $b_1$  clientes sintonizados no canal 1,  $b_2$  clientes sintonizados no canal 2, e assim por diante sabendo à partida que se têm  $n$  clientes activos. Decorre do anteriormente exposto que  $n$  é dado pela soma de todos os clientes que se encontram a sintonizar um qualquer canal (e, como tal, activos), ou seja,  $n$  é definido por

$$n = \sum_{k=1}^K b_k \quad (4.5)$$

Como  $P(A \mid B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$  então  $P(A \cap B) = P(B)P(A \mid B)$ . Sendo assim,  $\omega_B$  será dada pela equação (4.6). O primeiro termo ( $P[n_a=n]$ ) será uma distribuição binomial e o segundo ( $P[c_1=b_1, c_2=b_2, \dots, c_k=b_k \mid n_a=n]$ ) uma distribuição multinomial. Uma distribuição multinomial é uma generalização da distribuição binomial para os casos em que existem mais do que dois resultados possíveis. Mais informações sobre esta distribuição poderão ser encontradas no Anexo A.3, que se encontra no final deste trabalho.

$$\begin{aligned} \omega_B &= P[c_1=b_1, c_2=b_2, \dots, c_k=b_k] \\ &= P[n_a=n].P[c_1=b_1, c_2=b_2, \dots, c_k=b_k \mid n_a=n] \\ &= \frac{N!}{(N-n)!} (1-a)^{N-n} a^n \prod_{k=1}^K \frac{(\pi_k)^{b_k}}{b_k!} \end{aligned} \quad (4.6)$$

### 4.2.1 Cenário Estático

Neste cenário, o operador da rede ‘divulga’ os  $M$  canais ( $M \leq K$ ) com maior popularidade em multicast e os restantes (se requisitados pelo cliente) em unicast. Existem diversas possibilidades para a escolha de  $M$ , das quais se destaca a minimização de custos. Os canais mais populares são escolhidos pelo operador (o método de escolha desses canais sai fora do âmbito deste trabalho), fixos e distribuídos em multicast. De notar que não se torna eficiente transportar canais com menos de  $\beta$  utilizadores (nele sintonizados) em multicast uma vez que se está a assumir que um canal multicast consome mais recursos que um canal unicast.

Os  $M$  canais mais populares são, então, permanentemente distribuídos enquanto que os canais em unicast só são distribuídos caso haja clientes a requisitarem-nos. Assim sendo, nesta situação, o que se coloca em causa é a determinação do número de canais requisitados em unicast ( $n_u$ ), já que os de multicast são fixos e iguais a  $M$  ( $n_m=M$ ). Pretende-se, portanto, determinar a probabilidade de ter  $i$  canais em unicast sabendo que existem  $n$  utilizadores (activos) a sintonizar canais, ou seja  $P[n_u=i|n_a=n]$ . Note-se que  $n_u$  é uma variável aleatória.

Sendo a probabilidade de um utilizador querer ver um canal multicast dada por

$$P_m = \sum_{k=1}^M \pi_k \quad (4.7)$$

e a probabilidade de um utilizador querer ver um canal unicast dada por

$$P_u = 1 - P_m, \quad (4.8)$$

então a probabilidade de ter  $i$  canais requisitados em unicast será dada, recorrendo a (4.6) e aos preceitos que estiveram na base da sua dedução, por

$$\begin{aligned}
 P[n_u = i] &= \sum_{n=0}^N P[(n_a = n) \wedge (n_u = i)] \\
 &= \sum_{n=0}^N P[n_a = n] P[n_u = i | n_a = n] \\
 &= \sum_{n=0}^N \frac{N!}{(N-n)!} (1-a)^{N-n} a^n \frac{(P_u)^i (P_m)^{n-i}}{i!(n-i)!}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

O total de recursos necessários ( $r_s$ , em custo de número de canais unicast) para o cenário estático é igual à soma do custo dos canais unicast requisitados com o custo dos canais multicast. Também  $r_s$  é uma variável aleatória. O custo dos canais multicast toma o valor de  $\beta M$  em unidades de custo de canais unicast. Equacionando resulta em

$$r_s = n_u + \beta n_m = n_u + \beta M. \tag{4.10}$$

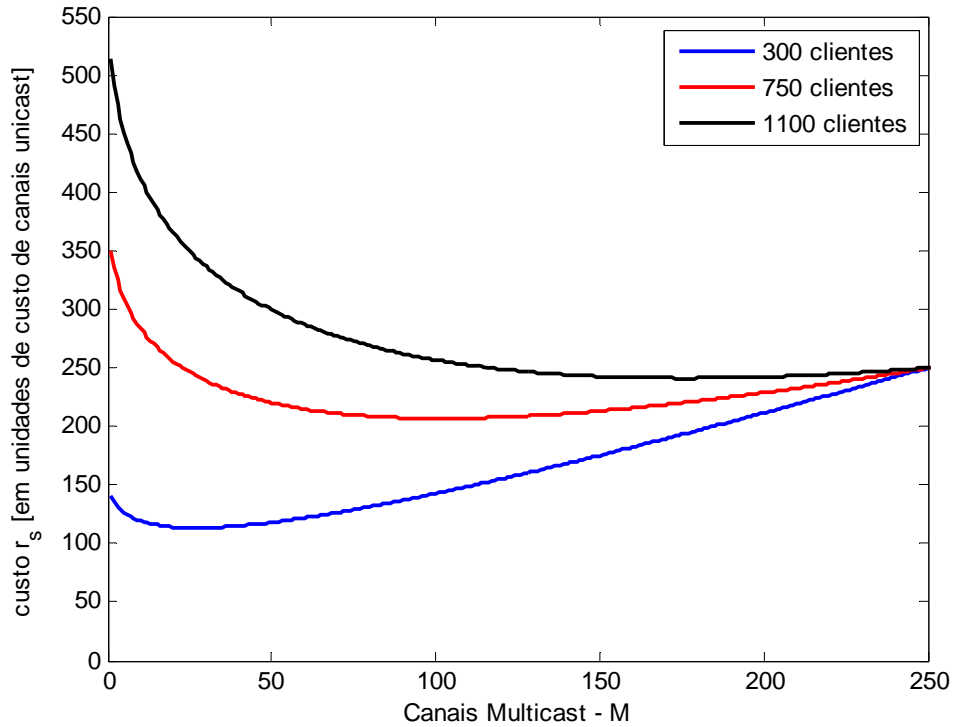
É possível determinar o número médio de  $r_s$ . Para isso, e uma vez que  $n_m = M$ , basta determinar o número médio de  $r_s$ , ou seja, o primeiro momento.

$$E[n_u] = E_{n_a} [E[n_u | n_a]] = E_{n_a} [n_a P_u] = N a P_u \tag{4.11}$$

Desta forma, o número médio dos recursos  $r_s$  será dado, recorrendo a (4.7), (4.8) e a (4.10) por

$$\begin{aligned}
 E[r_s] &= E[n_u + \beta M] = E[n_u] + \beta M \\
 &= N a P_u + \beta M \\
 &= N a \left( 1 - \sum_{k=1}^M \pi_k \right) + \beta M.
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

É possível então simular (via Matlab®) a equação (4.12), representando o custo médio (em unidades de custo de canais unicast) em função do número de canais multicast (M), para três valores diferentes do número de utilizadores do sistema (N). Assumindo como parâmetros de simulação  $\alpha=0.7$ ,  $a=0.5$ ,  $\beta=1$  e N a poder tomar os valores de 300, 750 e 1100, obteve-se a figura 4.1. Através dessa figura é possível verificar que existe um valor de M para o qual os custos são minimizados, sendo que esse valor de M depende do número de clientes no sistema. Quanto maior o número de clientes, maior será o custo total e maior será o valor de M que minimiza os referidos custos.



**Figura 4.1** Custo ( $r_s$ ) em função do número de canais multicast (M) para 3 valores diferentes do número de utilizadores (N)

Uma vez que  $n_m=M$  (valor determinístico pois M é constante/fixo), a probabilidade dos recursos, no cenário estático, serem superiores a um determinado número de recursos (que se irá designar por  $r$ ) será dado pela expressão (4.13). Do primeiro ramo verifica-se que se  $r$  for inferior aos recursos necessários para os canais multicast (que são fixos) então para haver

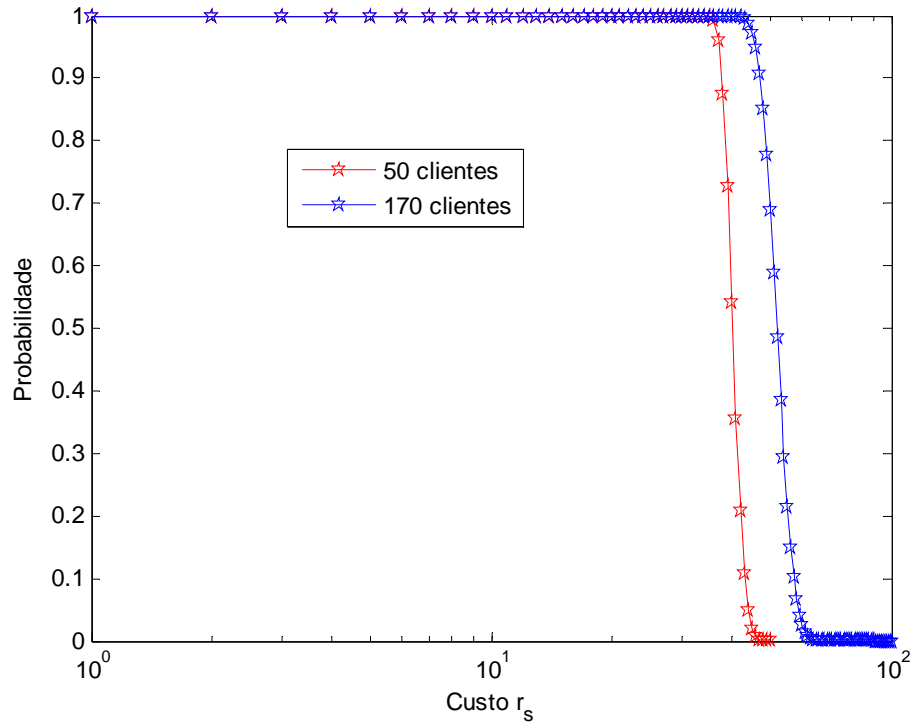
canais unicast, os recursos  $r_s$  terão de ser obrigatoriamente maiores que  $r$  e daí surge que  $P[r_s > r] = 1$ . Já no segundo ramo ( $r \geq \beta M$ ), a probabilidade  $P[r_s > r]$  encontra-se dependente da relação entre a diferença entre  $r$  e os recursos ‘alocados’ aos canais multicast e o número de canais unicast que se pretendem.

$$P[r_s > r] = \begin{cases} 1 & \text{se } r < \beta M \\ P[n_u > r - \beta M] & \text{se } r \geq \beta M \end{cases} \quad (4.13)$$

Assumindo as equações deduzidas anteriormente podem-se simular os resultados via Matlab®. Para efectuar a simulação, ter-se-á primeiro de definir os parâmetros de entrada. Os valores escolhidos para os aludidos parâmetros de entrada são  $K=60$ ,  $\alpha=0.9$ ,  $\beta=1$  e  $a=0.7$ . Adicionalmente também se irão considerar dois casos para dois valores distintos de  $N$  (número de clientes do sistema): um para  $N=50$  (clientes) e outro para  $N=170$  (clientes). Os valores de  $N$  são baixos devido às limitações do programa de simulação. Fez-se então uma simulação para obter a Função de Distribuição Cumulativa Complementar (CCDF) em função do número de recursos do cenário estático ( $r_s$ ). O resultado da simulação encontra-se na figura 4.2.

Conforme se pode verificar, para o caso de 50 clientes (curva a vermelho), os 35 primeiros canais são enviados em multicast. De facto, nesta situação, são primeiro enviados os canais multicast e, só depois, é que são enviados os canais unicast (se requisitados pelo cliente). Observa-se, então, que enquanto os recursos disponíveis forem inferiores aos recursos exigidos para transmitir os canais multicast previamente definidos, a probabilidade será igual a 1. Está, portanto, de acordo com o primeiro ramo da equação 4.13.

Também pela análise da figura, verifica-se que, a partir do momento que os recursos disponíveis atingem a meta dos recursos necessários para os canais multicast, começam a aparecer os canais unicast. Esta situação está de acordo com o segundo ramo da equação (4.13). Perante isto pode-se afirmar que os resultados corroboram o modelo matemático estudado para o cenário estático.



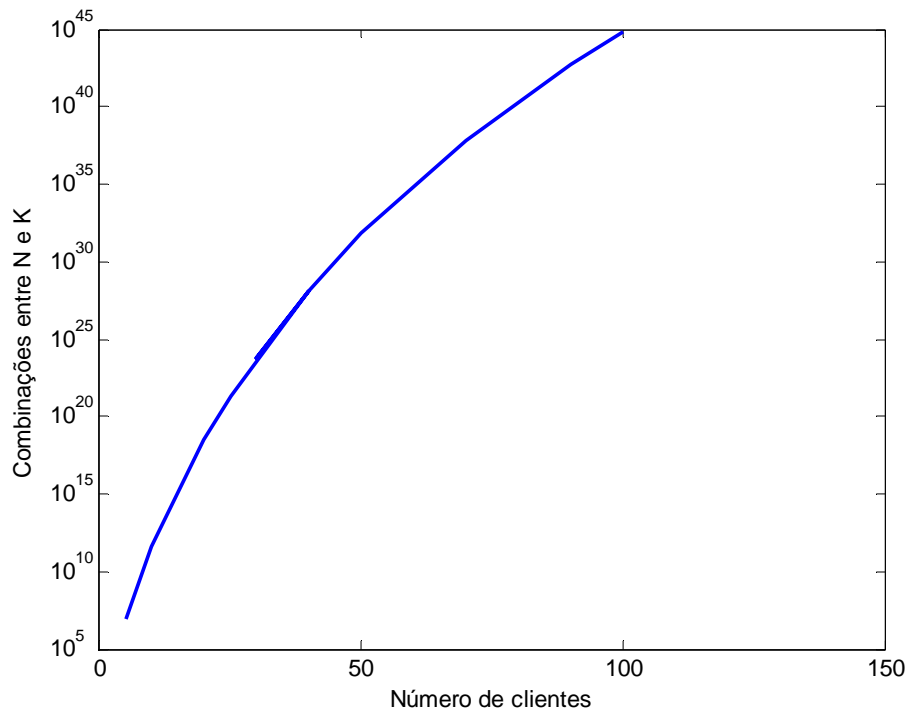
**Figura 4.2 Função de Distribuição Cumulativa Complementar em função do custo  $r_s$**

A análise que se acabou de fazer resulta de uma abordagem dita exacta do problema. Contudo a análise exacta estática, e conforme já referido, possui um vector B (eq. 4.14) com muitas formas possíveis e portanto de grande dimensão. De facto, num cenário real, existe um elevadíssimo número de combinações possíveis entre o número de canais disponibilizados (K) e o número de clientes (N), como se pode ver em (4.14).

$$C_N^{N+K} = \frac{(N+K)!}{N!K!} \quad (4.14)$$

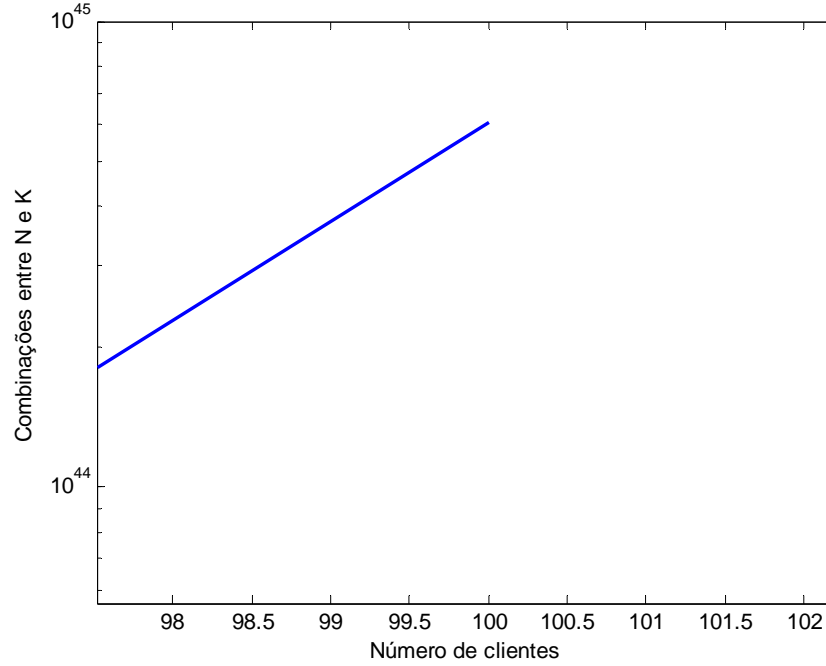
Um operador de rede tem, tipicamente, um número elevado de cliente e oferece um elevado número de canais. Assim, cenários reais implicam um aumento substancial de K e N, o que ainda vem aumentar mais o número de combinações possíveis. Isto leva a que o esforço computacional seja demasiado ‘pesado’.

Considere-se então que se têm 60 canais para distribuição e que o número de clientes pode variar entre 5 e 150 (valores inferiores ao número de clientes de um operador, devido às limitações do Matlab®, mas elucidativos). Estes resultados, embora de âmbito académico, permitem comprovar o elevado número de combinações possíveis entre  $N$  e  $K$ . De facto, o esforço computacional é tão forte para determinar essas combinações, que o Matlab® não consegue concluir os cálculos (ver figura 4.4) para um número de clientes superior a 100. A este respeito note-se que, na figura 4.3, que a simulação foi projectada para um máximo de 150 clientes.



**Figura 4.3** Número de combinações possíveis entre o número de canais disponibilizados ( $K$ ) e o número de clientes ( $N$ )





**Figura 4.4 Detalhe da figura 4.3. O esforço computacional é tão forte para determinar as combinações (referidas na figura 4.3), que o Matlab® não consegue concluir os cálculos**

Na sequência do exposto, irá proceder-se a um conjunto de aproximações relativamente aos resultados apresentados. Primeiramente não serão tidos em conta os vectores B com probabilidades abaixo de um determinado limiar e depois podem-se adoptar técnicas recursivas para determinar as probabilidades associadas aos vectores B. No entanto, ainda assim, os cálculos exactos só são viáveis para valores de N e K pequenos devido, em grande parte, às técnicas recursivas. Desta forma seguir-se-á a seguinte abordagem: os valores de  $n_u$  e  $n_m$  irão ser considerados determinísticos ou aproximáveis por uma distribuição normal. Irá proceder-se, então, à análise por aproximação à distribuição normal.

Comece-se, então, por apresentar a média do número de canais unicast (recorde-se que o número de canais multicast é um valor determinístico). Conforme calculado em (4.11), a média será dada pelo primeiro momento de  $n_u$ , ou seja,

$$E[n_u] = NaP_u.$$

É ainda necessário calcular o desvio padrão do número de canais unicast. Para isso, e de acordo com as propriedades da esperança matemática ([Anexo A.4]), é preciso determinar o segundo momento de  $n_u$  (referências [8] e [9]):

$$E[(n_u)^2] = NaP_u (P_m + (1-a)P_u) + (NaP_u)^2 \quad (4.15)$$

Daqui resulta de imediato ([Anexo A.4]) que o desvio padrão é dado por

$$\sigma_{n_u} = \sqrt{Var(n_u)} = \sqrt{NaP_u (P_m + (1-a)P_u)} \quad (4.16)$$

É importante introduzir agora um novo parâmetro (probabilidade de bloqueio):  $P_{bloq}$ . A importância deste parâmetro advém dele representar a probabilidade dos recursos necessários serem superiores aos recursos disponíveis, ou seja, de haver falta de recursos. Caso essa falta se verifique (recursos necessários superiores àqueles que se encontram disponíveis), o sistema tenderá a bloquear.

Não esquecendo que se deseja uma solução económica, pretende-se usar o menor número de recursos possível mas evitando o bloqueio. Ou seja, pretende-se um valor de  $R_s$  tal que se verifique (por (4.11)) que  $P[r_s > R_s] \leq P_{bloq}$ , sendo  $R_s$  dado pelo seguinte (referências [8] e [10]):

$$R_s = \beta M + NaP_u + \text{erfc}^{-1}(P_{bloq}) \sqrt{NaP_u (1 - aP_u)} \quad (4.17)$$

Tal como já foi referido,  $P_u$  é a probabilidade de um utilizador se encontrar activo e sintonizado num canal unicast. Na prática este valor resulta da soma das probabilidades  $\pi_k$  (popularidade do canal k) dos canais que, de entre o conjunto total de canais K, são colocados um unicast ( $M \leq k \leq K$ ) a pedido do cliente:

$$P_u = d \sum_{i=M+1}^K i^{-\alpha} \quad (4.18)$$

É, então, oportuno verificar o comportamento do custo  $R_s$  com a variação do número de canais multicast (M) e com a relação  $\beta$ , ou seja, como variam os custos (com M e  $\beta$ ) quando o

sistema está limitado a uma determinada probabilidade de bloqueio. É essa situação que se encontra descrita na figura 4.5. Os parâmetros de simulação são  $N=900$ ,  $\alpha=0.7$ ,  $a=0.7$  e  $P_{block}=10^{-4}$  mas nesta situação consideraram-se dois valores diferentes para  $\beta$ :  $\beta=1$  ( $c_m$  igual a  $c_u$ ) e  $\beta=1.5$  ( $c_m$  maior que  $c_u$ ). Um valor de  $\beta$  mais elevado traduz-se num valor de  $M$  que minimiza o custo  $R_s$  inferior. No entanto os custos são superiores para o caso em que  $\beta$  é maior.

O custo  $R_s$  também varia com o grau de actividade dos clientes, conforme pode ser observado na figura 4.6. Um grau de actividade pequeno ( $a=0.2$ ) corresponde uma situação em que estão poucos clientes activos (por exemplo durante a manhã, quando as pessoas se encontram no trabalho). Por outro lado, um grau de actividade elevado ( $a=0.7$ ) corresponde a uma situação em que existem muitos clientes activos (por exemplo ao fim da tarde, quando os utilizadores regressam a casa, vindos dos seus empregos). Quanto maior o grau de actividade, maior será o número de clientes activos, maiores serão os custos e maior será o valor de  $M$  que os minimiza.

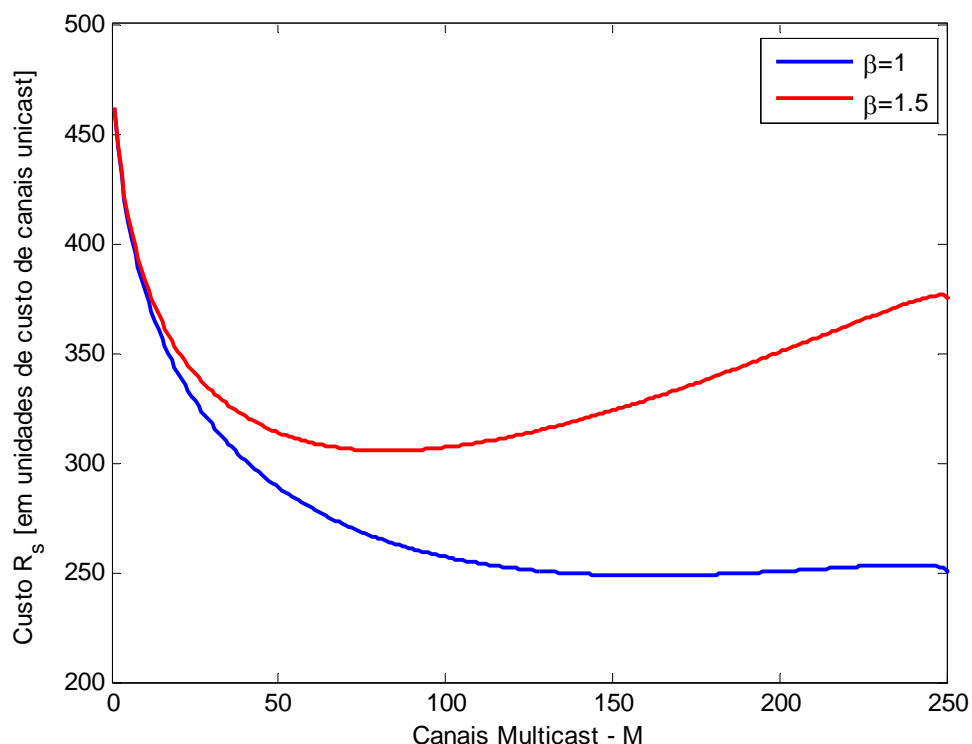


Figura 4.5 Variação do custo  $R_s$  com o número de canais multicast (M) para dois valores diferentes de  $\beta$ .

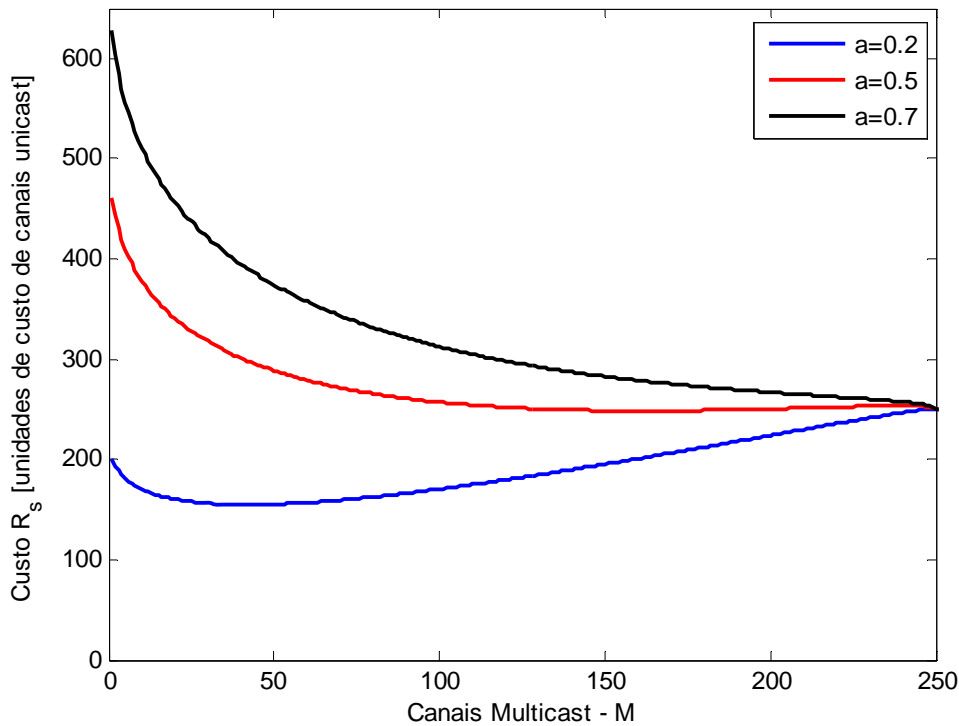


Figura 4.6 Variação do custo  $R_s$  com o número de canais multicast (M) para 3 valores diferentes do grau de actividade ( $a$ )

#### 4.2.2 Parâmetros do Cenário Estático: M

Do anteriormente exposto, pode-se verificar o seguinte:

- 1) Se os K canais foram colocados em multicast, então o custo (em unidades de custo de canais unicast) será dado pelo número de canais multicast (M), em unidades de custo de canais unicast (ou seja,  $\beta M$ ). Nesta situação não existe flexibilidade alguma e todos os canais são transmitidos em multicast independentemente do número de utilizadores neles sintonizados.

- 2) Se os canais se encontrarem todos em unicast então o custo será (em unidades de custo de canais unicast), no pior dos casos, igual ao número de clientes  $N$ , visto que cada cliente estará a visualizar apenas um canal. Este caso traduz-se numa maior flexibilidade mas também num maior desperdício de recursos.

É necessário, então, um compromisso entre a [necessária] flexibilidade e a utilização eficiente dos recursos disponíveis. A figura seguinte representa uma curva de dimensionamento típica, através da qual se pode estimar o custo (em unidades de custo de canais unicast) necessário para uma determinada probabilidade de bloqueio.

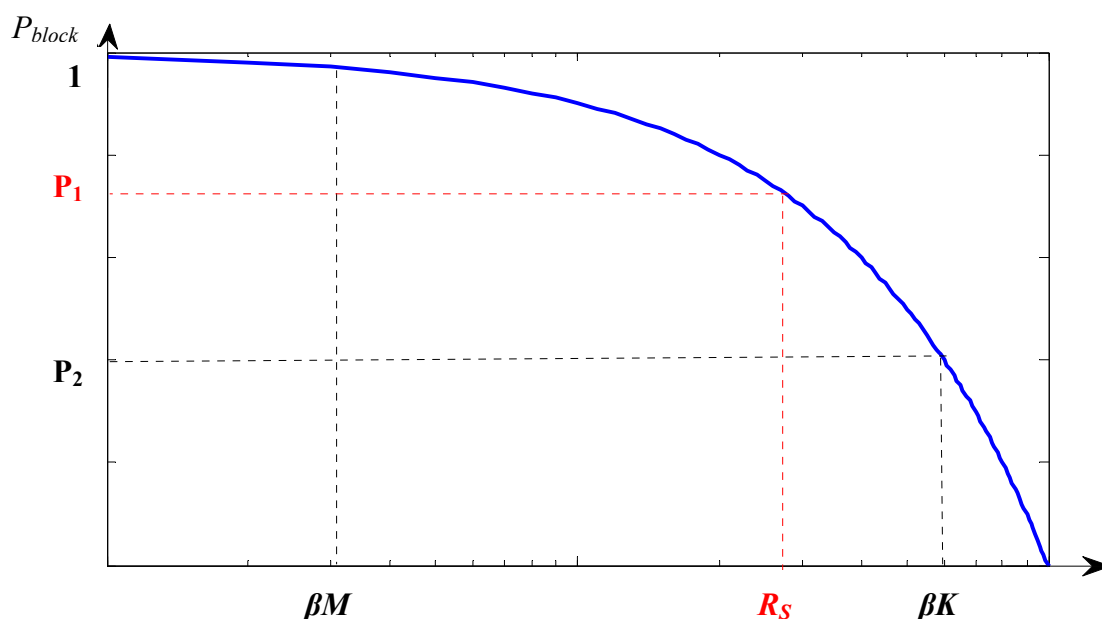


Figura 4.7 Função distribuição de  $r_s$

A figura 4.7, ilustra a seguinte situação: os recursos  $R_s$ , para um dado valor de  $P_{bloq}$ , têm de ser necessariamente inferiores a  $\beta K$  (para haver ganho em termos de recursos) e são, de acordo com o já abordado, superiores (ou iguais a)  $\beta M$ . Caso se verificasse  $R_s \geq \beta K$ , seria economicamente mais benéfico colocar todos os canais em multicast (e portanto com um custo igual a  $\beta M$ ).

O valor do custo  $R_s$ , de acordo com (4.17) encontra-se em função de  $M$ , ou seja,  $R_s=f(M)$ . Encontrar o mínimo de  $R_s=f(M)$  significa encontrar um valor para  $M$  que implique o menor número de recursos (para um determinado conjunto de parâmetros da rede). Da teoria matemática, sabe-se que este mínimo pode ser encontrado através da primeira derivada em ordem a  $M$  e posteriormente determinar o valor de  $M$  para o qual essa derivada muda de sinal. Outra hipótese (a que foi usada neste trabalho) consiste na simulação da equação que traduz os custos para obter o valor de  $M$  que os minimiza.

Os parâmetros  $\alpha$  e  $K$  podem ser considerados caracterizantes do sistema pelo que se pode dizer que serão razoavelmente constantes não sofrendo, portanto, variações frequentes. Desta forma, a sua eventual variação não se reveste de grande importância no contexto do presente trabalho.

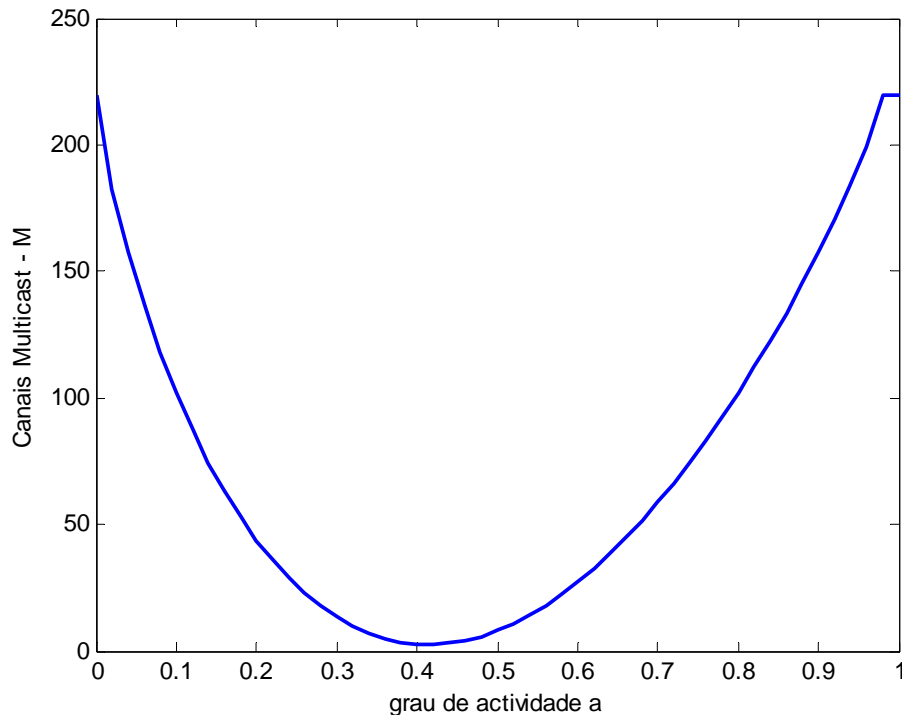
Por outro lado, o número de utilizadores ( $N$ ) são passíveis de uma forte variação, o que pode provocar, como já se viu, alterações significativas no sistema. De facto, o número de clientes de um *Service Provider*, pode aumentar ou diminuir muito ou pouco de uma forma rápida ou lenta. O grau de actividade ( $a$ ) é também, dada a sua natureza, passível de uma maior variação, uma vez que o comportamento dos clientes é imprevisível.

É, então, interessante verificar qual a variação do número de canais multicast ( $M$ ) com o grau de actividade ( $a$ ). A expressão para obter  $M$ , resulta da manipulação da equação (4.17) e é a seguinte:

$$M = \frac{R_s - NaP_u - \operatorname{erfc}^{-1}(P_{block})\sqrt{NaP_u(1-aP_u)}}{\beta}. \quad (4.19)$$

Para efeitos de simulação, considere-se o seguinte conjunto de parâmetros:  $R_s=220$ ,  $P_{block}=10^{-4}$  e  $\beta=1$ . Nesta situação irá considerar-se, adicionalmente, que  $N=1500$  e variar  $a$

(grau de actividade) entre 0 e 1. Note-se que quanto maior for o valor do grau de actividade, maior será o número de clientes activos. Os resultados encontram-se na figura 4.8.



**Figura 4.8** Variação do número de canais multicast ( $M$ ) com o grau de actividade ( $a$ )

É possível, então, verificar que existe um grau de actividade óptimo que minimiza o número de canais  $M$  e, como tal, os custos. Assim sendo, no dimensionamento da rede, tem de se ter em mente que o número de utilizadores e o seu grau de actividade pode variar de uma forma imprevisível. Este facto acarreta riscos caso o referido dimensionamento seja feito somente com base no valor mínimo de  $M$  (que minimiza  $R_s=f(M)$ ). Desta forma o mais seguro é, na dúvida, considerar um valor para  $M$  superior ao valor óptimo.

### 4.2.3 Cenário Dinâmico

O cenário estático pode-se encontrar desajustado quanto à realidade. Um operador tende a ter muitos clientes e cada um terá o seu gosto particular pelo que a popularidade de um canal pode variar muito. Definir ‘manualmente’ os canais mais populares requer demasiado esforço (principalmente em termos de recursos humanos), situação que se pretende evitar. O cenário estático tende a ser, pois, muito limitativo.

No cenário dinâmico, o operador selecciona o modo de transporte dos canais de acordo com o número de utilizadores ligados a esse canal num determinado instante. Isto requer, naturalmente, para saber o número de utilizadores sintonizados em cada canal, uma monitorização constante que é feita sem que o utilizador disso se aperceba. Este cenário, baseado no comportamento estocástico dos clientes activos, vislumbra-se como uma hipótese para as arquitecturas IPTV fixas e para as emergentes redes de TV móvel onde a popularidade de um canal pode mudar em questão de segundos.

Se num determinado instante se verificar que existem mais de  $\beta$  utilizadores sintonizados num determinado canal, esse canal será transmitido, por ser mais eficiente em termos de custos (nomeadamente relativamente à largura de banda), em multicast. No caso inverso os canais (caso sejam requisitados pelos clientes) serão distribuídos em unicast. Assim sendo, tanto o número de canais multicast como o número de canais unicast serão variáveis aleatórias.

Em virtude da sua natureza, o cenário dinâmico requer um esforço computacional ainda maior do que o esforço necessário no cenário estático devido à necessidade de constante monitorização do sistema, o que leva a que o tempo de simulação seja maior. De forma a diminuir o esforço e, conseqüentemente, o tempo de simulação irão considerar-se valores muito pequenos para  $K$  e  $N$ . Também aqui se pode observar uma análise exacta. Nesta situação, os números de canais unicast e multicast serão regidos pelas fórmulas seguintes:

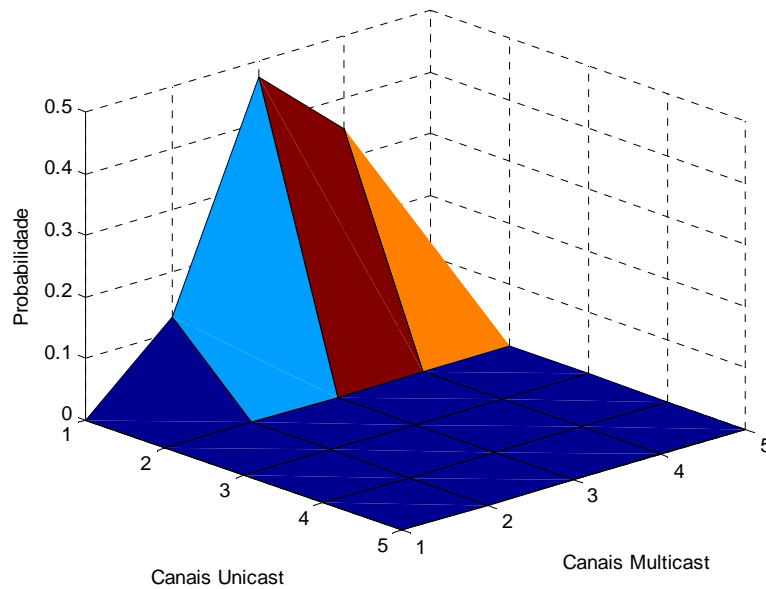


$$P[n_m = i] = \sum_B 1_{\{B: \text{canais multicast}=i\}} \omega_B \quad (4.20)$$

$$P[n_u = i] = \sum_B 1_{\{B: \text{canais unicast}=i\}} \omega_B \quad (4.21)$$

A expressão  $\{B: \text{canais multicast}=i\}$  simboliza o subconjunto de vectores pertencentes a B para os quais o número de canais a distribuir em multicast é  $i$ . Analogamente ao caso anterior, a expressão  $\{B: \text{canais unicast}=i\}$  representa o subconjunto de vectores pertencentes a B para os quais o número de canais a distribuir em unicast é  $i$ . O operador  $1_{\{A\}}$  funciona da seguinte maneira: toma o valor 1 caso a condição A seja verdadeira e toma o valor 0 no caso contrário. Este operador designado por função indicadora.

Na simulação feita, consideram-se como parâmetros  $N=5$  (número de clientes) e  $K=4$  (numero de canais disponibilizados) e o gráfico resultante (que se encontra na figura 4.9) representa a probabilidade conjunta dos canais multicast e unicast. Quer isto dizer que, através do gráfico se pode saber qual a probabilidade de ter  $x$  canais multicast e  $y$  canais unicast. Mais uma vez os valores usados na simulação encontram-se limitados pelo programa usado (Matlab®).



**Figura 4.9 Probabilidade conjunta dos canais multi e unicast**

Como se pode verificar sempre que a soma dos dois tipos de canais é superior ao valor definido por  $K$ , a probabilidade conjunta é zero, o que é natural. De facto, só existindo 4 canais é impossível ter, a título de exemplo, 4 canais multicast e 2 canais unicast. Já nos restantes casos, as probabilidades parecem pacíficas. Como exemplo pode-se referir que a probabilidade de ter 3 canais em multicast e, ao mesmo tempo, um canal unicast, é aproximadamente 0.45.

Este cenário, se analisado de uma forma exacta, padece, contudo, do mesmo problema que o cenário estático para efeitos de simulação. De facto o vector  $B$  (definido anteriormente) continua a poder atingir uma elevada dimensão (ver equação (4.14)) devido aos elevados valores para  $N$  e  $K$  numa situação dita real. Ir-se-á, portanto, utilizar a mesma abordagem que se usou para o cenário estático: análise por aproximação à distribuição normal.

Desta forma, assumindo uma distribuição normal para  $n_m$ ,  $n_u$  e  $r_D$ , podem-se definir expressões para essas variáveis. Uma vez que, como já foi referido, não se torna eficiente transportar canais em multicast com menos de  $\beta$  utilizadores (nele sintonizados), o número de canais unicast será dado pela soma, entre todos os canais fornecidos, daqueles que têm o número de utilizadores sintonizados compreendidos entre 1 e  $\beta$ , ou seja,  $1 \leq i \leq \beta$ . Traduzindo, obtém-se a expressão seguinte, onde  $c_k$  é uma variável aleatória que corresponde aos utilizadores sintonizados no canal  $k$ .

$$n_u = \sum_{k=1}^K \sum_{1 \leq i \leq \beta} i \mathbf{1}_{\{c_k=i\}} \quad (4.22)$$

O operador  $\mathbf{1}_{\{A\}}$  (função indicadora) funciona tal como descrito anteriormente: toma o valor 1 caso a condição  $A$  seja verdadeira e toma o valor 0 no caso contrário. Atendendo à propriedade da função indicadora de  $A$  ser a probabilidade de  $A$ , a média de  $n_u$  será dada por

$$E[n_u] = \sum_{k=1}^K \sum_{1 \leq i \leq \beta} i P[c_k = i]. \quad (4.23)$$

A respectiva variância será dada então por

$$\begin{aligned} Var[n_u] = & \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq l}}^K \sum_{l=1}^K \sum_{1 \leq i \leq \beta} \sum_{1 \leq j \leq \beta} ij (P[c_k = i, c_l = j] - P[c_k = i]P[c_l = j]) + \\ & + \sum_{k=1}^K \left( \sum_{1 \leq i \leq \beta} i^2 P[c_k = i] - \sum_{1 \leq i \leq \beta} \sum_{1 \leq j \leq \beta} ij P[c_k = i]P[c_k = j] \right) \end{aligned} \quad (4.24)$$

Em sintonia com o já exposto, o número de canais multicast será dado pelos canais que, de entre os  $K$  disponibilizados, possuam mais de  $\beta$  clientes. Desta forma,  $n_u$  será dado pela seguinte expressão:

$$n_m = \sum_{k=1}^K 1_{\{c_k > \beta\}}. \quad (4.25)$$

Analogamente ao que se verificou para o caso de unicast já visto, a média de  $n_m$  será dada por

$$E[n_m] = \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{i > \beta} P[c_k = i] \right] = \sum_{k=1}^K \left[ 1 - \sum_{0 \leq i \leq \beta} P[c_k = i] \right] \quad (4.26)$$

A probabilidade dos canais estarem em multicast é complementar da probabilidade dos canais estarem em unicast, ou seja,  $P[\text{unicast}] + P[\text{multicast}] = 1$ , visto que só existem estas duas hipóteses para a distribuição dos canais. Relativamente à expressão (4.26), note-se que se percorrem todos os canais disponibilizados e se escolhem, de entre esses, aqueles que não se encontram em unicast, ou seja,  $\sum_{i > \beta} P[c_k = i] = 1 - \sum_{0 \leq i \leq \beta} P[c_k = i]$  (tome-se particular atenção aos limites de variação dos somatórios).

Também de forma análoga ao que se verificou para o caso de unicast, a variância para o caso de multicast será dada por

$$\begin{aligned} Var[n_m] = & \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq l}}^K \sum_{l=1}^K \sum_{i > \beta} \sum_{j > \beta} (P[c_k = i, c_l = j] - P[c_k = i]P[c_l = j]) + \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{i > \beta} P[c_k = i] \left( 1 - \sum_{j > \beta} P[c_k = j] \right) \end{aligned} \quad (4.27)$$

À semelhança de (4.10), tem-se que os recursos necessários para o caso dinâmico é dado pelo custo dos canais unicast somado ao custo dos canais multicast, em unidades de custo de canais unicast (multiplicado por  $\beta$ ). Equacionando resulta na expressão seguinte

$$r_D = n_u + \beta n_m. \quad (4.28)$$

Com vista a determinar a variância de  $r_D$ , e tal como acontecia no caso estático, é necessário obter o primeiro e o segundo momento de  $r_D$  ([Anexo A.4]). De acordo com as propriedades do operador esperança matemática e por (4.10), o primeiro e o segundo momentos são dados pelas equações (4.29) e (4.30). É de referir que  $r_D^2$  é um quadrado de uma soma, o que pela teoria matemática resulta em  $r_D^2 = n_u^2 + 2\beta n_u n_m + n_m^2$ .

$$E[r_D] = E[n_u] + \beta E[n_m] \quad (4.29)$$

$$\begin{aligned} E[r_D^2] = & E[(n_u)^2] + 2\beta E[n_u n_m] + \beta^2 E[(n_m)^2] \\ = & E[(n_u)^2] + \beta^2 E[n_u n_m] \\ & + 2\beta \sum_{k=1}^K \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^K \sum_{\substack{1 \leq j \leq \beta \\ l \neq k}} j \left( P[c_k = j] - \sum_{0 \leq i \leq \beta} P[c_k = j, c_l = i] \right) \end{aligned} \quad (4.30)$$

Assim sendo a variância será dada por

$$Var[r_D] = Var[n_u] + \beta^2 Var[n_m] + 2\beta A, \quad (4.31)$$

sendo

$$\begin{aligned} A = & \sum_{k=1}^K \sum_{1 \leq i \leq \beta} i P[c_k = i] \left( \sum_{0 \leq j \leq \beta} P[c_k = j] - 1 \right) \\ & - \sum_{k=1}^K \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^K \sum_{1 \leq i \leq \beta} \sum_{0 \leq j \leq \beta} i (P[c_k = i, c_l = j] - P[c_k = i] P[c_l = j]). \end{aligned} \quad (4.32)$$

Para finalizar, as probabilidades marginais e conjuntas que surgiram ao longo desta secção (cenário dinâmico) são dadas (referências [8] e [9]) por:

$$P[c_k = i] = \frac{N!}{i!(N-i)!} (1 - a\pi_k)^{N-i} (a\pi_k)^i \quad (4.33)$$

$$P[c_k = i, c_l = j] = \frac{N!}{i!j!(N-i-j)!} (1 - a\pi_k - a\pi_l)^{N-i-j} (a\pi_k)^i (a\pi_l)^j \quad (4.34)$$

Também é possível (referência [9]) definir o número de canais unicast (e expressões derivadas) para o caso em que um canal é colocado em multicast logo que possui mais que um utilizador nele sintonizado. Nesta situação o limite de passagem de unicast para multicast é muito baixo pelo que um canal com apenas dois ou três utilizadores será transmitido já em multicast. Comparativamente com canais com dezenas ou centenas de utilizadores isso representa um desperdício de recursos. Este caso não apresenta, portanto, grande interesse prático, pelo que não será abordado neste trabalho.

Perante este modelo, pode-se agora retomar a questão do sincronismo. Tem-se então dois modelos para obtenção do sincronismo da rede.

O primeiro modelo (Método da Ethernet Síncrona) actua a nível da camada física pelo que não será alvo de mais detalhes. No segundo modelo, por seu lado, encontram-se duas

hipóteses. Em qualquer uma das hipóteses, de forma a se manter e propagar o sincronismo na rede, é importante haver um canal dedicado para a troca das marcas temporais (fluxo dedicado de pacotes IP) responsáveis pelo sincronismo. Em última instância poder-se-á reservar uma percentagem de um canal para o fluxo de pacotes de sincronismo. Tanto numa como noutra situação, o canal onde as marcas temporais circulam deve ter a máxima prioridade disponível (de entre as prioridades programadas) na rede, conforme as recomendações que se encontram na tabela 3.2.

## 5 Conclusões

Existe, hoje em dia, uma crescente necessidade de largura de banda devido ao crescente número de serviços suportados pelas redes de telecomunicações. Por outro lado esses serviços são cada vez mais exigentes no que diz respeito à largura de banda: se por um lado querem assegurar o seu bom funcionamento (evitar congestionamentos), por outro os próprios serviços têm uma largura de banda mínima elevada. Estas necessidades acarretam custos, que devem ser tidos em consideração no momento de planeamento de novos serviços e redes. Neste momento a fibra óptica é a tecnologia capaz de responder a esta ânsia por uma cada vez maior largura de banda, a um custo menor.

As redes começaram com o sistema de telefonia fixa mas esta tecnologia foi sendo progressivamente alterada para fazer face a novas necessidades: fossem elas respeitantes à adaptação da tecnologia de forma a torna-la ‘usável’ (caso do PDH sobre o SDH para a telefonia fixa), fossem para inovar e levar a tecnologia mais além. Tais desenvolvimentos levaram ao aparecimento de problemas (tais como a questão da multiplexagem, do sincronismo e ainda da (in)eficiência) que foram sendo estudados e superados.

De desenvolvimento em desenvolvimento chegou-se à actualidade, em que se verifica uma clara mudança de paradigma: de um serviço inicial de telefonia fixa os clientes passaram a ter, frequentemente, pequenas redes locais nas suas instalações. Para fazer face a esta mudança, a fibra, pelas suas características, tornou-se o meio de transporte por excelência. Nas camadas superiores a Ethernet passou, progressivamente, a dominar e tem visto um grande desenvolvimento nos últimos anos. Hoje em dia cada utilizador acaba por ter à saída (entrada) das suas instalações interfaces Ethernet.

A *Ethernet* está, assim, a adquirir um papel cada vez mais relevante no mercado das redes de transporte devido, principalmente, à sua popularidade (é a tecnologia de LAN's mais

usada na actualidade), à crescente necessidade de largura de banda e ao ‘novo’ tipo de tráfego (maioritariamente de dados ao invés de voz). Baseada na comutação de pacotes, a Ethernet foi padronizada pelo IEEE.

A Ethernet, contudo, foi pensada para transferências de dados em áreas relativamente pequenas (*campus* ou empresas). Por esse motivo, dado o largo crescimento das redes, a *Ethernet* está a tornar-se incapaz de gerir de uma forma eficiente essas redes cada vez maiores, apresentando alguns problemas (seja do ponto de vista técnico, seja do ponto de vista económico). Apesar disso as velocidades têm vindo a aumentar, conforme se viu no segundo capítulo. Desejando-se, então, um serviço rápido, eficaz, simples e o mais barato possível, surgiu então o *Carrier Ethernet* como uma tentativa de resposta aos problemas da Ethernet (baixa escalabilidade para redes alargadas; resiliência e capacidade de recuperação de falhas na rede com as consequentes quebras de QoS e dos níveis de segurança). O uso de uma tecnologia baseada em Ethernet para as novas redes de transporte justifica-se, em grande parte, pelo facto de cerca de 95% de todo o tráfego se iniciar ou terminar numa porta Ethernet. Consegue-se evitar, assim, a necessidade de conversão de protocolos e tende-se a poupar na formação de recursos humanos.

O MEF definiu, então, por um lado as características que caracterizam os Serviços *Carrier Ethernet* (comparativamente com outras tecnologias) e, por outro, as regras que têm de ser escrupulosamente cumpridas para que o *Carrier Ethernet* seja reconhecido, de facto, como tal. O *Carrier Ethernet* define-se como um serviço e uma rede de transporte normalizada e ubíqua que se distingue das tradicionais LAN's através dos seguintes cinco atributos:

1. Serviços normalizados
2. Escalabilidade
3. Confiabilidade
4. Qualidade de Serviço
5. Gestão do serviço



Estes cinco atributos, como se teve oportunidade de ver, não funcionam isolados, antes pelo contrário. Funcionam em conjunto, estando muitas das vezes intimamente ligados, de forma a obter uma tecnologia mais coerente, forte e sustentável.

Existem, no entanto, problemas que ainda dificultam a total aplicação da Ethernet às redes de transporte. A elevada dimensão das redes que existem actualmente (MAN's e WAN's) dificultam o uso de mecanismos de *flooding* o que inviabiliza o uso de técnicas como as de *Spanning Tree* e suas variantes. Esta situação leva ao questionamento de qual a melhor forma de distribuir o tráfego: se em multicast ou se em unicast.

Ao logo deste trabalho teve-se oportunidade de verificar a mudança de paradigma que está a acontecer na área das redes de telecomunicações. Essa mudança foi igualmente aludida anteriormente neste capítulo. Os operadores, num espírito de concorrência querem oferecer cada vez mais serviços a um preço cada vez menor. Nesse sentido, começaram a aparecer estudos que mostram que a melhor solução sob o ponto de vista económico é uma mistura entre as tecnologias de broadcast e unicast. Esta questão é de extrema importância pois condiciona o desenvolvimento e aplicação de novos serviços como o IPTV ou o VoIP. A Ethernet não pode ser aplicada se não conseguir satisfazer os clientes (e os operadores) no mínimo da mesma maneira que as actuais tecnologias satisfazem. Só desta forma se torna atractivo (e lucrativo) apostar no *Carrier Ethernet*.

Existe ainda a limitação inerente à fibra ópticas. De facto, o *Carrier Ethernet*, sendo suportado por fibra óptica, encontra-se limitado às regiões/edifícios onde essa infra-estrutura já esteja instalada. Regiões afastadas dos grandes centros metropolitanos e/ou edifícios antigos não possuem, tipicamente, fibra óptica instalada, o que limita o acesso ao *Carrier Ethernet* por parte, por exemplo, de PME's (Pequenas e Médias Empresas), que constituem grande parte do mercado empresarial e, conseqüentemente, grande parte dos potenciais clientes.

Adicionalmente pode acontecer que as empresas tenham módulos (p.e escritórios e unidade fabril) espalhados geograficamente, cada um servido por um *Service Provider* diferente. Nesta situação caso pode suceder que nem todos os *Service Providers* disponibilizem o *Carrier Ethernet*. Na pior das hipóteses pode acontecer que nem todas as localizações possuam fibra óptica instalada. Para empresas deste tipo o *Carrier Ethernet* só se torna atractivo se todos os seus módulos poderem ser ligados pela mesma tecnologia. A última dificuldade em implementar o *Carrier Ethernet* está na potencial resistência dos clientes na adesão a algo novo, pese embora possam reconhecer o valor da nova tecnologia.

O *Carrier Ethernet* adquire importância não só no mercado das redes fixas mas também no mercado das redes móveis, mercado esse que tem vindo a crescer e é visto como uma boa oportunidade de negócio para os *Service Providers*. No entanto, também as redes móveis necessitam de uma cada vez maior largura de banda pelo que possuem o mesmo problema das redes fixas relativamente a este recurso. Para além da sua flexibilidade, a Ethernet permite também a rápida transferência de controlo entre as estações pertencentes às redes móveis.

Uma vez que o tráfego não é todo igual (e a experiência nas redes assim o confirma) é necessário criar classes de serviço de modo a rentabilizar os recursos (nomeadamente a largura de banda) e a que os clientes sejam servidos da melhor maneira possível. Desta forma foram criadas quatro classes de serviço que, da mais prioritária para a menos prioritária são as seguintes:

1. Telefonia (voz)
2. *Streaming* de vídeo
3. Serviços interactivos
4. Serviços não interactivos

Se a questão do sincronismo já é importante nas redes fixas, nas redes móveis torna-se uma questão ainda mais importante uma vez que um cliente em movimento não pode perder a ligação à rede. As estações base têm de passar o controlo da ligação de umas para as outras sem que isso afecte a ligação do cliente, situação só possível com um grande sincronismo. O

sincronismo encontra-se também ligado às classes de serviço e às respectivas prioridades. Não existem limites para o número de classes de serviço mas pode ser necessário compactar classes conforme se viu na tabela 3.2. Independentemente do número de classes e tipo de prioridades disponíveis, os pacotes de sincronismo deverão ser sempre enviados com a maior prioridade possível

Foi já referido que a melhor solução de distribuição do tráfego reside numa mistura entre transmissão em multicast e em unicast. Fica por saber, no entanto, qual a melhor maneira de fazer essa mistura, ou seja, como modelar o sistema. Assim sendo, ao longo deste trabalho abordaram-se duas possíveis soluções: cenário estático e cenário dinâmico.

No cenário estático os canais mais populares são difundidos em multicast (M) e os restantes, mediante requisição do cliente, em unicast. Há que ter em conta, no entanto, que o número de canais multicast (M) está dependente da variação de outros parâmetros, principalmente o número de clientes (N) e o grau de actividade ( $a$ ), cujos valores podem mudar de uma forma rápida. Por outro lado os custos têm de ser minimizados. O valor de M que minimiza os custos, como se teve oportunidade de ver, variam também com o número de clientes (N) e o grau de actividade ( $a$ ) e com  $\beta$ .

Relativamente à variação dos custos (em função do número de canais multicast M) com o número de clientes, foi possível concluir que quanto maior o número de clientes, maiores serão os custos e maior o valor de M que minimiza os referidos custos.

Já no que diz respeito à variação dos custos (em função do número de canais multicast M), quando o sistema se encontra limitado a uma determinada probabilidade de bloqueio, com a relação  $\beta$ , concluiu-se que um valor de  $\beta$  superior leva, no limite, a um aumento dos custos. No entanto um valor de  $\beta$  elevado traduz-se igualmente num valor de M que minimiza os custos inferior, relativamente ao caso em que se possui um  $\beta$  baixo.

Os custos variam igualmente, conforme já foi referido, com o grau de actividade dos clientes ( $a$ ). Com este trabalho verificou-se que quanto maior o grau de actividade, maior o número de clientes activos e portanto maiores serão os custos. Também foi possível verificar

que o aumento do grau de actividade leva a um aumento do valor de  $M$  que minimiza os custos.

No que diz respeito à escolha do valor de  $M$ , observou-se a sua variação com o grau de actividade ( $a$ ), tendo-se confirmado a existência de um valor de  $a$  que minimiza o número de canais multicast  $M$ . Perante tudo isto é possível dizer que, aquando da escolha do valor de  $M$  (no cenário estático) tem de se tomar em consideração a sua variação com outros parâmetros.

No cenário dinâmico, por sua vez, o modo de transporte dos canais (unicast ou multicast) é escolhido de acordo com o número de utilizadores sintonizados em cada canal num determinado instante. Este cenário é menos limitativo que o cenário estático mas também é mais pesado computacionalmente.

Foi possível, então, estudar um modelo analítico para ambos os casos, com dedução de fórmulas, simuladoras de comportamentos que se consideram desejáveis e/ou ilustradores do comportamento.

Ambos os cenários apresentam vantagens e desvantagens mas o cenário estático, para o que se deseja na actualidade, ou seja, para arquitecturas de IPTV fixas e redes de TV móvel progressivamente mais autónomas, parece demasiado limitativo, principalmente a nível dos operadores das redes. Desta forma o modelo dinâmico é o que se apresenta como mais viável para uma solução de futuro.

## Anexo A

Serve o presente anexo como auxiliar ao capítulo 4 deste trabalho. Aqui serão abordados conceitos matemáticos que, embora saindo fora do âmbito da tese, ajudam à melhor compreensão do terceiro capítulo.

### A.1 – Variáveis e Processos de *Bernoulli*

Se  $A$  for um acontecimento que resulta de uma experiência aleatória, então a variável de Bernoulli (ou função indicadora de  $A$ ) será definida do seguinte modo:

$$I_A(\zeta) = \begin{cases} 1, & \text{se } \zeta \in A \\ 0, & \text{se } \zeta \notin A \end{cases}$$

O contradomínio será  $D' = \{0, 1\}$ ;  $p(0) = p$  e  $p(1) = 1 - p$ .

### A.2 – Distribuição binomial

Considere-se que  $X$  é o número de vezes que o acontecimento  $A$  referido anteriormente ocorre depois de se repetir  $n$  vezes uma experiência aleatória. Então esta variável  $X$  é uma variável binomial (que também pode ser vista como a soma de  $n$  variáveis de *Bernoulli* – vistas atrás).

O contradomínio será  $D' = \{0, 1, \dots, n\}$

A função de probabilidade de uma distribuição binomial é dada por

$$P(X = x) = \binom{n}{x} (p)^x (1 - p)^{n-x}$$

onde

$p$  = probabilidade de  $n$  sucessos nas  $n$  repetições da experiência

### A.3 – Distribuição Multinomial

A distribuição multinomial é uma generalização da distribuição binomial, para os casos em que existam mais do que dois resultados possíveis. Considerando uma experiência com  $k$  resultados possíveis ( $B_1, B_2, \dots, B_k$ ), estes resultados são mutuamente exclusivos. Isto significa que se um dos resultados ocorre, então nenhum dos outros pode ocorrer. O conjunto ( $B_1, B_2, \dots, B_k$ ) forma o espaço amostral da experiência. Considere-se ainda que a experiência é repetida  $n$  vezes, sempre nas mesmas condições e que  $p_j = P(B_j)$ . Se  $X_j$  for a variável aleatória representativa do número de ocorrências do evento  $B_j$  nas  $n$  repetições, então  $\sum_{j=1}^k X_j = n$ .

Desta forma a função de probabilidade de uma distribuição multinomial assume a seguinte forma:

$$P(X = n_1, \dots, X_k = n_k) = \frac{n!}{n_1! n_2! \dots n_k!} p_1^{n_1} p_2^{n_2} \dots p_k^{n_k},$$

sendo que  $\sum_{j=1}^k p_j = 1$

## A.4 – Esperança matemática e variância

A variância de uma variável aleatória é dada por

$$Var(X) = E[(X-E[X])^2]$$

Desenvolvendo o quadrado da diferença obtém-se

$$\begin{aligned} Var(X) &= E[(X-E[X])^2] = \\ &= E[X^2 - 2XE[X] + E[X]^2] = \\ &= E[X^2] - 2E[XE[X]] + E[X]^2 = \\ &= E[X^2] - E[X]^2 \end{aligned}$$

Finalmente o desvio padrão de uma variável aleatória é definido da seguinte forma

$$\sigma_X = \sqrt{Var(X)}$$

A média de uma distribuição binomial é dada por  $\mu_X = np$  e a variância por  $\sigma^2 = np(1-p)$ .

A média de uma distribuição multinomial é dada por  $E(X_i) = np_i$  e a variância por  $Var(x) = np_i(1-p_i)$ .





## Referências Bibliográficas

- [1] Fouli, Kerim; Maier, Martin - *The road to Carrier-Grade Ethernet*, Communications Magazine, March 2009;
- [2] Calafati, Glen – *Leveraging Carrier Ethernet for Wireless Backhaul. A Case Study: “Supporting legacy Systems While Investing For Tomorrow”*, MEF;
- [3] Lohmar, Thorsten; Horn, Uwe - *Hybrid Broadcast-Unicast distribution of Mobile TV over 3G Networks*, IEEE Magazine, 2006;
- [4] Heuck, Christoph - *Benefits and limitations of hybrid (broadcast/mobile) networks*;
- [5] Hartung, Frank; Horn, Uwe; Huschke, Jörg; Kampmann, Markus; Lohmar, Thorsten; Lundevall, Magnus - *Delivery of Broadcast Services in 3G Networks*, IEEE Transactions on Broadcasting, vol 53, nº1, Março 2007;
- [6] <http://metroethernetforum.org> ;
- [7] Berger, Rong Fu & others - *Next Generation Network Based Carrier Ethernet Test Bed for IPTV Traffic*, July 2009;
- [8] Avramova, Zlata & others – *Capacity Gain of Mixed Multicast/Unicast Transport Schemes in TV Distribution Network*, IEEE Transactions on Multimedia, August 2009;

- [9] Avramova, Zlata & others – *Models to Estimate the Unicast and Multicast Ressource Demand for a Bouquet of IP-Transported TV Channels*;
- [10] Avramova, Zlata & others – *Dimensioning Multicast-Enabled Networks for IP-Transported TV Channels*, 2007;
- [11] Fang, Luyang; Zhang, Raymond; Taylor, Michael -*The evolution of Carrier Ethernet services – requirements and deployment case studies*, IEEE Communications Magazine, March 2008;
- [12] Kasim, Abdul & others – *Delivering Carrier Ethernet: Extending Ethernet beyond the Lan*, McGraw-Hill, 2008;
- [13] Elangovan, Anush - *Efficient Multicasting and Broadcasting in Layer 2 Provider Backbone Networks*, IEEE Communications Magazine, November 2005;
- [14] MEF 22 *Mobile Backhaul Implementation Agreement Phase I*, MEF, January 2009;
- [15] Ali, Maher & others - *Traffic Engineering in Metro Ethernet*, IEEE Network, March/April 2005;
- [16] Yu, Hao & others - *IPTV Traffic Management Using Topology-Based Hierarchical Scheduling in Carrier Ethernet Transport Networks*;
- [17] Vaz, Francisco – *Probabilidades e Processos Estocásticos para Engenharia Electrotécnica*, Universidade de Aveiro, 2002;
- [18] *Carrier Ethernet for Mobile Backhaul Implementation Agreement*, MEF, February 2009.

